



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Estudio numérico-experimental del oleaje en las proximidades del Puerto de Bilbao, como herramienta de gestión portuaria

Treball realitzat per:

Alejandro Botella Langa

Dirigit per:

Octavio Cesar Möso Aranda

Grau en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, **setembre de 2019**

EHMA - LIM/UPC – Laboratorio de Ingeniería Marítima

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

Primero de todo, quisiera agradecer a mi tutor, Dr. Cesar Möso, la paciencia y dedicación que ha tenido conmigo durante la elaboración de este TFG. Y también por enseñarme líneas de investigación de la Ingeniería Marítima que no se llegan a ver en las aulas. A Elvia Benedith por su colaboración y la ayuda que recibí por su parte en los inicios del trabajo, ya que me ayudó a familiarizarme con los programas utilizados.

A mis padres por haber creído siempre en mí, y por haber luchado cada día para darnos lo mejor a mi hermana y a mí, dándonos recursos para que nunca nos faltará nada y pudiéramos triunfar en la vida. Pero sobretodo, por ser un pilar fundamental de mi vida y saber que siempre podré contar con ellos.

A mis amigos y compañeros de la universidad, tanto los de Obras Públicas como los de Ingeniería Civil, con los que hemos estado codo con codo estos años de carrera. Con ellos hemos compartido todos los sentimientos que podemos desarrollar a lo largo de la carrera, con un punto de reunión habitual, el bar, a cuyo personal también me gustaría agradecer la camaradería con la que nos reciben siempre. A mi amigo de la infancia Quim, por haber estado siempre ahí cuando le he necesitado, una persona que sólo se merece lo mejor.

Por último, al igual que los grandes artistas se guardan lo mejor de su repertorio para el final, mis mejores palabras sólo pueden para mi pareja, Sara. Por estar a mi lado y aguantarme en los peores momentos, cuando he llegado a ser insoportable debido al estrés. Por quererme tal y como soy y siempre creer en mí. Creo que nunca llegaré a tener suficientes palabras de agradecimiento por poder compartir nuestras vidas. Simplement t'estimo.

Abstract

Coastal zones have been strategically important for the oceanic nations through history. Human activities such as tourism and industry developed in that nations, are usually the main economical resource and, for that reason, it is mandatory to develop tools for harbour's administration. This tools allows, for instance, to analyze internal port areas that could be vulnerable in storm conditions, and may interrupt some port's activities.

The aim of this study is to analyze the wave data collected along the vicinity of the Port of Bilbao, in the Basque Country, and to determine the validation of the SWAN wave model, which has been the software used to carry out the simulations. The numerical simulation will allow to simulate the wave field under different physical scenarios and its impact in the zone, focusing on the wave distribution along the Port of Bilbao. That will allow to determine which zones could be more vulnerable during storm conditions.

In order to achieve the main goal of this study, it has been necessary to analyze the field data and to select the storm events. Then, the computational grid has been prepared, as well as the coding script for the simulation in SWAN, as explain in the methodological chapter. Finally, the results from the wave model are compared with the field data, in order to validate the programme through the computing of the error. Moreover, in the conclusion chapter it is proposed some future works.

Resumen

La franja costera ha sido históricamente una franja estratégica para las naciones que disponen de frente marítimo. El turismo y la industria que se desarrolla en estas zonas, son la principal fuente de ingresos de estos territorios, por lo que hace indispensable contar con herramientas de gestión portuaria. Ello permite evaluar, entre otros, las zonas interiores de los puertos más vulnerables bajo condiciones de tormenta, que pueden llegar a influir sobre su operatividad.

El principal objetivo de este trabajo, es el de analizar los datos de oleaje observados mediante una campaña de medidas en las proximidades del Puerto de Bilbao y, con ellos, validar simulaciones numéricas del oleaje realizadas con el modelo SWAN. La simulación numérica, una vez validada con los datos de campo, permitirá la simulación del campo de oleaje bajo distintos escenarios de forzamiento del mismo y su impacto en la zona, haciendo hincapié en la distribución del oleaje dentro del Puerto de Bilbao. Ello permitirá establecer las zonas que son más vulnerables bajo condiciones de tormenta.

Para poder cumplir este objetivo ha sido necesario, primero de todo, analizar los datos de las campañas de campo y seleccionar los eventos de tormenta. A continuación, se han llevado a cabo los pasos para la preparación del modelo en SWAN, y que se describen en el capítulo de metodología. Finalmente, se ha comparado las simulaciones llevadas a cabo con los datos observados en las campañas de campo, mediante la cuantificación del error entre los datos medidos y los datos modelados. Para concluir el trabajo, se han propuesto los trabajos futuros para su aplicación a la gestión portuaria.

Contenido

Lista de figuras	vi
Lista de tablas	viii
1.- Introducción	1
1.1.- Interés y motivación.....	1
1.2.- Objetivos	2
1.3.- Estructura	3
2.- Zona de estudio	4
2.1.- El Puerto de Bilbao y su entorno.....	4
2.2.- Playas de estudio: localización.....	6
2.2.1.- Playa de la Arena (ENT1).....	8
2.2.2.- Playa de Aizkorri (ENT2)	8
2.2.3.- Playa de La Salvaje (ENT3)	9
2.2.4.- Playa de Sopelana (ENT4)	10
2.2.5.- Playa de Ereaga (INT1)	10
2.2.6.- Playa de Arrigunaga (INT2)	11
3.- Metodología: Descripción de campañas de campo y modelado numérico	12
3.1.- Campañas de campo	12
3.1.1.- Instrumentación y fondeos	12
3.2.- Propagación del oleaje.....	17
3.3.- Ecuaciones de gobierno	19
3.4.- Modelado con SWAN	20
3.5.- Esquemas numéricos	22
3.6.- Limitaciones	23
3.7.- Batimetría	23
3.8.- Generación de las mallas	25
3.9.- Simulación en SWAN.....	28
4.- Resultados y discusiones.....	30
4.1.- Medidas de los fondeos	30
4.2.- Resultados del modelo.....	33

5.- Conclusiones y trabajos futuros.....	38
5.1.- Conclusiones	38
5.2.- Trabajos futuros	39
 Anejo 1 – <i>Script utilizado para la simulación en SWAN</i>	40
 BIBLIOGRAFÍA	43

Lista de figuras

1.- Imagen de satélite de la zona de estudio, comprendida entre el Puerto de Bilbao y las playas adyacentes.	4
2.- Imagen de satélite con las principales zonas del Puerto de Bilbao, y las localidades en las que se enmarcan sus instalaciones.	5
3.- Localización de los instrumentos utilizados en la campaña de campo de primavera de 2017, extraída del informe de dicha campaña.	7
4.- Fotografía aérea de la playa de la Arena (ENT1), extraída del ICN.	8
5.- Fotografía aérea de la playa de Aizkorri (ENT2), extraída del ICN.	9
6.- Fotografía aérea de la playa de La Salvaje (ENT3), extraída del ICN.	9
7.- Fotografía aérea de la playa de Sopelana (ENT4), extraída del ICN.	10
8.- Fotografía aérea de la playa de Ereaga (INT1), extraída del ICN.	10
9.- Fotografía aérea de la playa de Arrigunaga (INT2), extraída del ICN.	11
10.- Buque de apoyo “Almirante Churruca”	13
11.- Instrumentos empleados, NORTEK AS – AQUADOPP 600KHz.	14
12.- Instrumentos empleados, NORTEK AS – AQUADOPP 2MHz.	14
13.- Instrumentos empleados, NORTEK AS – AWAC 1MHz	14
14.- Detalle de las estructuras de soporte ancladas a las losas de hormigón, con los equipos instalados en su interior, preparadas para su fondeo.	15
15.- Detalle de las losas de hormigón dispuestas en cubierta durante la operación de fondeo.	15
16.- Detalle de las operaciones de recuperación de los instrumentos fondeados.	16
17.- Ejemplo de la interpretación del espectro de los oleajes tipo <i>sea</i> y <i>swell</i> generados en el mar del Norte (Fuente: Holthuijsen, 2007)	19
18.- Batimetría de la zona de estudio complementada con los datos batimétricos de las campañas de campo.	24
19.- Ejemplo gráfico de cómo se realiza la triangulación mediante interpolación lineal	25
20.- Malla resultante tras el proceso de depuración de datos.	26
21.- Visualización de la malla de cálculo con los nodos que la conforman.	27

22.- Sustitución de los valores de los puntos que no contienen datos por el valor de -999	28
23.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en la Playa de la Arena. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.....	30
24.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en la Playa de la Aizkorri. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.....	31
25.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en la Playa de Ereaga. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.....	31
26.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en la Playa de Arrigunaga. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.....	32
27.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en el interior del Puerto de Bilbao. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto....	32
28.- Datos gráficos de altura de ola obtenidos en la boya costera de Puertos del Estado.....	33
29.- En esta gráfica se destaca la tormenta que ha sido utilizada para realizar las simulaciones en SWAN, que se dio entre el 16 y 30 de abril de 2017.....	34
30.- Comparativa entre los datos medidos (en azul) y los datos modelados en SWAN (en rojo) para cada una de las localizaciones del ámbito de estudio.	34
31.- Secuencia de la primera tormenta analizada, con intervalos de 5 horas aproximadamente entre fotogramas.	36
32.- Secuencia de la segunda tormenta analizada, con intervalos de 5 horas aproximadamente entre fotogramas.	36

Lista de tablas

Tabla 1.- Coordenadas geográficas de los instrumentos utilizados en la campaña de campo de primavera de 2017. También se incluye la profundidad a la que fueron fondeados y el código de cada fondeo..... 7

Tabla 2.- Resultados de la comparación entre las áreas formadas por las curvas de los datos medidos y modelados, junto con los errores absolutos y relativo para cada uno de ellos. 37

1.- Introducción

La zona litoral constituye la frontera entre los sistemas terrestres y marítimos, y aunque la franja costera representa una pequeña porción del globo, alrededor del 5%, alberga a aproximadamente la mitad de la población mundial [4]. De entre las actividades socioeconómicas que se realizan en la franja costera, una de las más importante es la portuaria, lo que hace imprescindible contar con programas de gestión. Ya que, si bien esta primera definición simplista del litoral no engloba toda su complejidad, se trata de un sistema con un carácter dinámico en continuo cambio.

El litoral ha sido históricamente una franja territorial estratégica para las naciones que disponen de frente marítimo. Pero a mediados del siglo XX, con el auge de la globalización, dos acontecimientos relevantes incrementan la importancia de estas zonas: por una parte, se generaliza el uso de contenedores para el transporte marítimo, y por otro, se constituyen leyes y políticas para la protección de la costa y así incentivar el turismo, que empezará a convertirse en la mayor fuente de ingresos de estas localidades. Por lo que respecta al transporte marítimo, se intensifican las rutas marítimas y los puertos empiezan a adaptar sus instalaciones para acoger buques cuyo calado va en aumento a medida que crece la demanda de mayores buques con mayor capacidad de carga [12].

Por estas dos casuísticas, la gestión portuaria, así como la de costas, tienen un papel cada vez más importante, ya que, además, estas áreas constituyen zonas de alto valor medioambiental. Por ello, la modelización numérica del oleaje es una de las herramientas fundamentales para poder comprender las consecuencias de cambios en el clima de oleaje, ya que permite hacer predicciones del medio marino en diferentes horizontes temporales. De esta manera, se convierte en una herramienta esencial tanto para la gestión portuaria, como para la gestión de costas, ya que permite planificar operaciones de protección preventivas. Estas operaciones pueden pasar por la configuración de defensas del litoral que, por ejemplo, podrían ser la construcción de diques de abrigo, o las operaciones de dragado para la alimentación de playas a fin de reparar las consecuencias de los procesos erosivos, o para aumentar el calado de las bocanas de los puertos donde se acumulan sedimentos.

1.1.-Interés y motivación

El puerto de Bilbao, gestionado por la Autoridad Portuaria de Bilbao (APB), se ha constituido como el puerto de referencia del denominado Arco Atlántico, en el Golfo de Bizkaia. Además, las playas adyacentes a la zona conocida como El Abra, en la costa de Bilbao, tienen un gran interés socioeconómico por la industria del turismo. Por ello, dentro un programa de gestión costera, resulta de gran valor conocer las características hidrodinámicas de la zona de estudio. Esta zona de estudio se detalla en el capítulo 2.

Así pues, los objetivos del presente trabajo se enmarcan en el proyecto *Asistencia técnica para el seguimiento del proyecto de extracción de arenas en el sector norte de la zona II de la APB (2016-2020) con especial vinculación al proyecto del espigón central*, encargado por la Autoridad Portuaria de Bilbao (APB) a la empresa AZTI Tecnalia y al Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC (LIM/UPC). En concreto, a lo que se refiere a la caracterización hidrodinámica respecto al estado actual de las playas, previo a los trabajos de dragado. Para ello, se combinarán datos de campo obtenidos en distintas campañas y el modelado numérico del oleaje registrado durante un episodio de tormenta con el software SWAN [TU Delft, 1999], que se describirá en capítulos posteriores.

A lo largo del trabajo se describirán las campañas los datos de la campaña de campo utilizados para poder realizar el modelo del oleaje. También, siempre que se necesario, se aportarán otros datos de estas campañas como, por ejemplo, la localización de los instrumentos utilizados, así como su tipología.

1.2.-Objetivos

El principal objetivo de la presente tesina es el de determinar la validación del software SWAN para el modelado del oleaje que se propaga en la zona del puerto de Bilbao y las playas adyacentes. Esta validación se llevará a cabo mediante la comparación entre los datos recopilados en las campañas de campo llevadas a cabo entre la primavera de 2016 y otoño de 2018, por la empresa AZTI Tecnalia y el Laboratorio de Ingeniería Marítima de la UPC (LIM/UPC), y los datos generados por el modelo. Con esto se podrá evaluar y cuantificar la variabilidad hidrodinámica de las playas objeto de estudio sin la influencia de las obras de dragado que se realizarán posteriormente a la toma de datos. El modelo posterior al dragado será objeto de estudio de los trabajos futuros. Por esta razón, será de especial interés documentar y cuantificar la presencia de eventos de calma/tormenta y distintos sectores direccionales.

A partir de aquí, se procederá a la puesta a punto del modelo de comportamiento a partir de las informaciones obtenidas en las campañas de campo con la batimetría previa a los trabajos de dragado. Así, la secuencia de trabajo seguirá el siguiente esquema:

- Obtención y depuración de la batimetría de la zona de estudio previa al dragado
- Preparación de las mallas a utilizar según la resolución que proporciona su tamaño
- Preparación del modelo
- Análisis de los resultados del modelo mediante la comparación con los datos obtenidos en las campañas de campo para cada playa
- Calibrado posterior del modelo para ajustar los resultados a los de las mediciones y así poder validar las simulaciones en distintos escenarios de forzamiento

1.3.-Estructura

A modo de clarificación, la estructura de este estudio responde al orden de la secuencia de trabajo:

- En el capítulo 2 se describe la zona de estudio, comprendida por el Puerto de Bilbao y las playas adyacentes.
- En el Capítulo 3 se describe la metodología empleada para llevar a cabo las simulaciones realizadas en este trabajo. También se describe, en líneas generales, los procedimientos de las campañas de campo, así como los instrumentos utilizados.
- En el Capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del modelo del oleaje realizado con SWAN, así como los resultados de la campaña de campo que han sido utilizados. Posteriormente se realiza una comparativa entre ambos resultados con el fin de determinar la validación del modelo.
- En el Capítulo 5, se presentan las conclusiones extraídas del trabajo. Asimismo, también se proponen los trabajos futuros considerados que se debieran realizar como continuación de esta tesina.
- Finalmente, en el Anejo 1 se adjunta el *script* que fue utilizado para la simulación tras ajustar sus parámetros.

2.- Zona de estudio

En el presente capítulo se describirá la zona de estudio de la cual es objeto esta tesina. Esta se desarrolla en las proximidades de la costa de Bilbao, entre el puerto y las playas adyacentes. Para poder describirla con más detalle, en este capítulo se describirá primero el puerto y sus infraestructuras, y después cada una de las playas enmarcadas en el ámbito de estudio. De esta manera, se pretende enfatizar la importancia socioeconómica que tienen éstas zonas sobre el territorio en cuanto a la industria y al turismo.

2.1.-El Puerto de Bilbao y su entorno

El puerto de Bilbao es un puerto marítimo español que se sitúa en la desembocadura en el Mar Cantábrico de la Ría del Nervión, o de Bilbao, a unos 15 km aguas abajo de la villa de Bilbao, en el norte de la Península Ibérica. La administración del puerto corresponde a la Autoridad Portuaria de Bilbao (APB), perteneciente, junto a otras 27 autoridades portuarias, al organismo estatal dependiente del Ministerio de Fomento, Puertos del Estado. La localización del puerto, que puede observarse en la imagen de satélite de la figura nº 111, responde a las siguientes coordenadas geográficas: 43° 21' 8.64" N, 3° 2' 56.04" W [2].



Figura 1.- Imagen de satélite de la zona de estudio, comprendida entre el Puerto de Bilbao y las playas adyacentes.

Como otras ciudades tradicionalmente industriales que han contado con un puerto fluvial, el puerto de Bilbao se trasladó desde el arenal en que estaba situado junto al Casco Viejo hasta su situación actual en el estuario del Nervión. Esta zona geográfica formada por las aguas costeras entre Punta Galea y Punta Lucero es conocida como El Abra Exterior.

El primer paso para su traslado se inició en 1905 con la construcción del dique de Santurtzi, habilitando aguas abrigadas para barcos de gran tamaño y evitando la obligación de un recorrido tortuoso y peligroso hasta el centro de Bilbao [1].

El traslado pudo hacerse completamente efectivo en la década de 1980, tras el cierre de El Abra con la construcción del dique de Punta Lucero, que fue el primer gran dique exterior construido en el Mar Cantábrico. Hasta entonces, el puerto seguía manteniendo su carácter fluvial. Con la construcción de este dique, el puerto pudo ampliar su capacidad de operación, no sólo con una mayor superficie navegable, si no con un calado de hasta 32 metros de profundidad. El alcance de estas instalaciones se extiende entre los municipios de Getxo, Portugalete, Santurtzi y Ciérvana, tal como puede apreciarse en la figura 2222. Con estas sucesivas ampliaciones, el puerto fue ganando terreno que se dedicó a mejorar las instalaciones industriales y comerciales ubicadas en el puerto.



Figura 2.- Imagen de satélite con las principales zonas del Puerto de Bilbao, y las localidades en las que se enmarcan sus instalaciones.

En la actualidad, está constituido como el puerto de referencia del denominado Arco Atlántico Europeo. Situado en el extremo oriental del Golfo de Bizkaia, se configura como un puerto de enlace con el continente americano, norte de Europa, África y Oriente, y especialmente preparado para el comercio con la fachada Atlántica de Europa, las Islas Británicas y el Mar Báltico.

En cuanto a su operatividad, el puerto dispone de:

- 20 km de muelles de hasta 32 metros de calado
- 1920 Ha de superficie de flotación
- 400 Ha de superficie terrestre útil

Las instalaciones del puerto de Bilbao disponen de terminales de mercancía general, contenedores, Ro-Ro, graneles sólidos, graneles líquidos, hortofrutícola y automóviles, además de 250 Ha de superficie de almacenamiento. También cuenta con una extensa zona logística para camiones y almacenaje de 4.500 automóviles. La distribución de estas instalaciones, puede dividirse en 3 bloques generales, tal y como se muestra en la figura 2. Además, cuenta con conexión a la red ferroviaria nacional desde los muelles y conexión directa con la red nacional de autopistas y autovías [16].

A parte de las infraestructuras portuarias, el ámbito del presente estudio también se centra en la línea de costa en la que se enmarca, y las playas adyacentes. Éstas se describen con mayor detalle en el siguiente apartado.

2.2.-Playas de estudio: localización

Dada la importancia socioeconómica que tiene sobre el territorio las infraestructuras del Puerto de Bilbao, en el apartado anterior se ha dedicado de manera casi exclusiva a definir las. Sin embargo, el alcance del ámbito de estudio de la presente tesina se extiende a las playas interiores del Abra (interior del puerto), así como las playas adyacentes. A continuación, se exponen los datos referidos a la localización de las playas que son objeto de estudio, mediante las coordenadas geográficas de los fondeos de los instrumentos utilizados durante la campaña de campo de la primavera de 2017.

Los datos utilizados para la generación del modelo de propagación del oleaje de la presente tesina se toman de las campañas de campo en las que se enmarca esta caracterización hidrodinámica de las playas. Así pues, a continuación, se muestran los datos de la localización de los instrumentos utilizados en las distintas playas de interés. También se muestra una imagen de satélite (ver figura 3) en la que se indican las coordenadas de estas playas, extraída de la documentación técnica del proyecto al que se hace referencia. La localización de estos instrumentos, que se muestran en la tabla 1, se obtuvieron a partir de los datos GPS a bordo de la embarcación de apoyo [18].

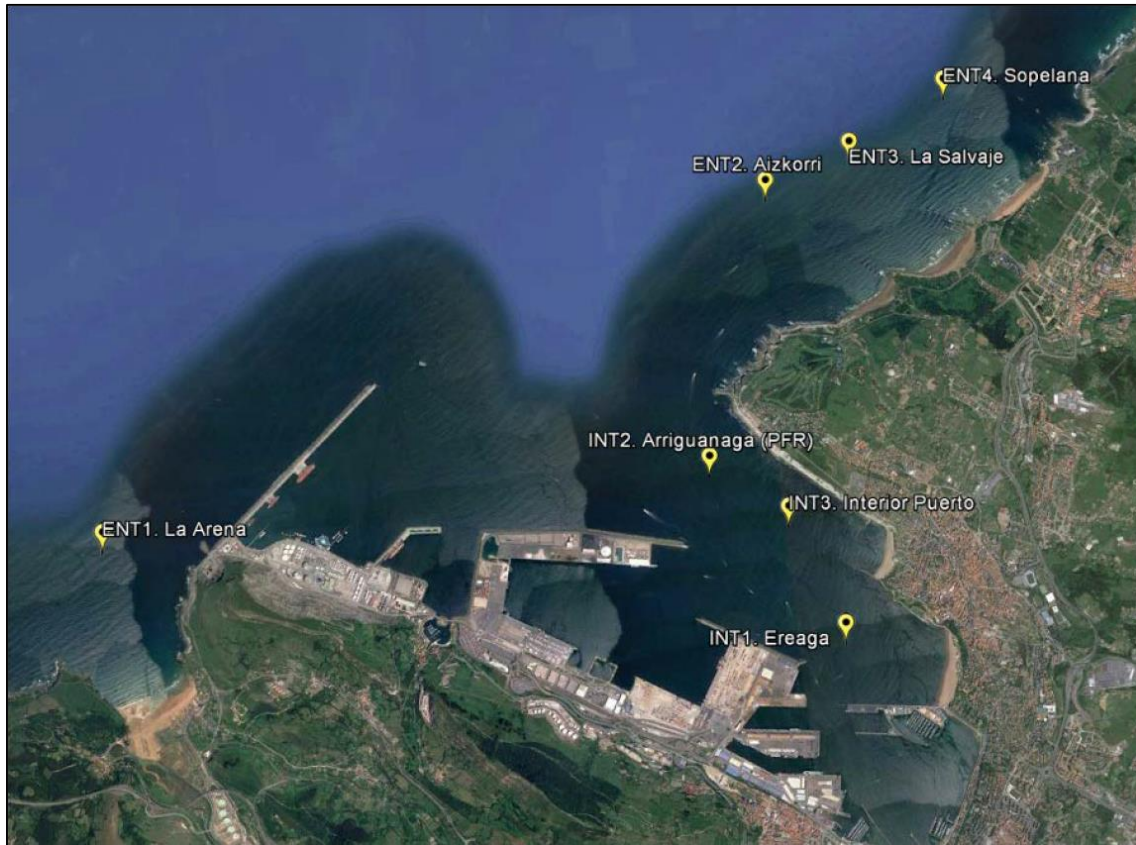


Figura 3.- Localización de los instrumentos utilizados en la campaña de campo de primavera de 2017, extraída del informe de dicha campaña.

Código	Localización	Latitud	Longitud	Profundidad
ENT1	Playa de La Arena	43° 21.881'N	3° 07.365'W	23.0m
ENT2	Playa de Aizkorri	43° 23.418'N	3° 01.750'W	21.8m
ENT3	Playa de La Salvaje	43° 23.610'N	3° 01.104'W	22.4m
ENT4	Playa de Sopelana	43° 23.947'N	3° 00.316'W	21.5m
INT1	Playa de Ereaga	43° 20.869'N	3° 01.554'W	14.2m
INT2	Playa de Arrigunaga (PFR)*	43° 21.926'N	3° 02.490'W	20.7m
INT3	Interior Puerto	43° 21.532'N	3° 01.919'W	11.7m

Tabla 1.- Coordenadas geográficas de los instrumentos utilizados en la campaña de campo de primavera de 2017. También se incluye la profundidad a la que fueron fondeados y el código de cada fondeo.

A continuación, se describen brevemente las playas de estudio junto con imágenes de fotogrametría aérea extraídas del archivo del instituto cartográfico nacional (ICN) para poder detallar la morfología de cada una de ellas. Estas imágenes también contienen datos cartográficos del propio ICN, y se han extraído de manera que contengan la mayor cantidad de información relevante. Además de conocer el detalle de su localización, el interés de estas

imágenes radica en la identificación de puntos característicos que se den en las simulaciones, así como posibles obstáculos para el oleaje o zonas reflejantes.

2.2.1.- Playa de la Arena (ENT1)

Esta playa se sitúa entre las localidades de Muskiz y Ciérvana, en la margen izquierda de la comarca del Gran Bilbao. Se trata de una playa de 966 metros de longitud de gran valor turístico, ya que permite la práctica del surf con todas las mareas. Los picos en los que se enmarca esta playa destacan por ser zonas de fuertes corrientes. En la figura 4 se muestra la fotografía aérea de la playa.

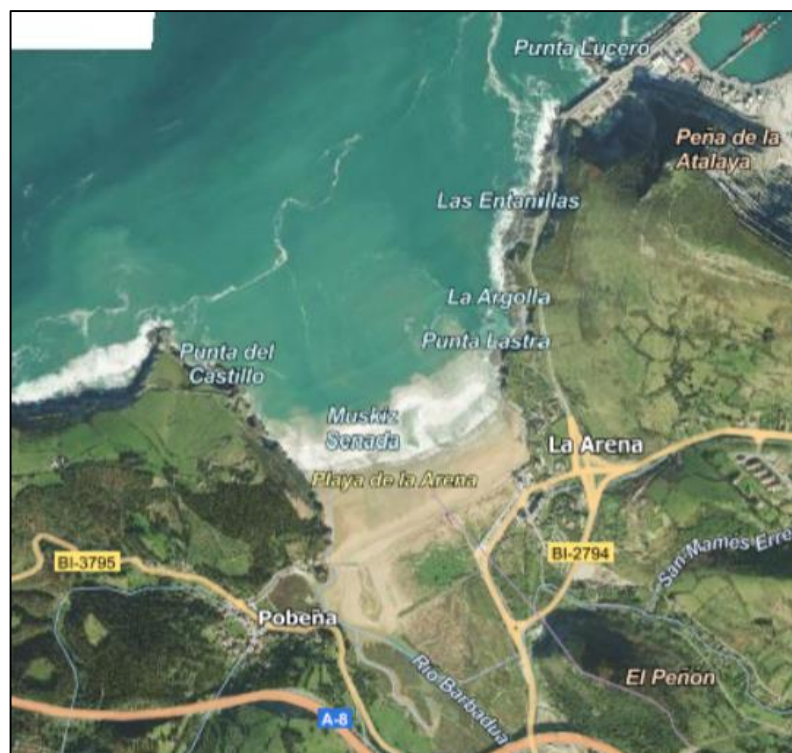


Figura 4.- Fotografía aérea de la playa de la Arena (ENT1), extraída del ICN.

2.2.2.- Playa de Aizkorri (ENT2)

La playa de Aizkorri, también conocida como Gorrondatxe, se sitúa en el ámbito municipal de Getxo, aunque alejada del casco urbano. Sin embargo, mantiene un alto valor turístico, sobre todo por la práctica del surf y otros deportes acuáticos. Además, al ser una playa de difícil acceso rodeada de acantilados abruptos, le confiere un alto valor medioambiental del que destaca la conservación de su propio sistema de dunas. La playa se enmarca entre las puntas de Askorri y Asbirilla, con una longitud de 844 metros. En la figura 5 se muestra la fotografía aérea de la playa.



Figura 5.- Fotografía aérea de la playa de Aizkorri (ENT2), extraída del ICN.

2.2.3.- Playa de La Salvaje (ENT3)

La playa de Barinatxe, también conocida como La Salvaje, está situada entre los municipios de Getxo y Sopela. Con una longitud de 752 metros y, al igual que las otras playas del ámbito de estudio, esta playa tiene un alto interés turístico por su calidad ambiental para la práctica de deportes acuáticos, pero también deportes como el parapente, debido a los fuertes vientos de la zona. Además, también cuenta con un sistema propio de dunas. En la figura 6 se muestra la fotografía aérea de la playa.

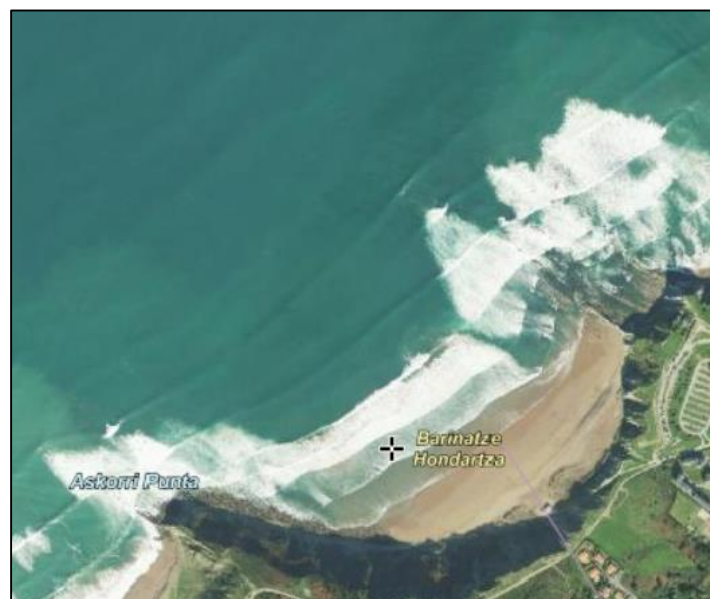


Figura 6.- Fotografía aérea de la playa de La Salvaje (ENT3), extraída del ICN.

2.2.4.- Playa de Sopelana (ENT4)

La playa de Sopelana, se sitúa en el municipio de Sopela. Se trata de una playa semiurbana de fácil acceso, con una longitud de 826 metros, por lo que es considerada como la tercera playa más larga de la provincia de Bizkaia. Cabe destacar que esta playa también se considera como dos playas distintas, sin ningún elemento separador, conocidas como Arrietara y Atxabiribil. En la figura 7 se muestra la fotografía aérea de la playa.



Figura 7.- Fotografía aérea de la playa de Sopelana (ENT4), extraída del ICN.

2.2.5.- Playa de Ereaga (INT1)

La playa de Ereaga se sitúa en el municipio de Getxo, en el interior del estuario del Nervión. Se trata de una playa urbana que se enmarca entre el puerto viejo de Algorta y el espigón de Arriluze. Con una longitud de 882 metros, cuenta con fáciles accesos debido a su configuración urbana. En la figura 8 se muestra la fotografía aérea de la playa.

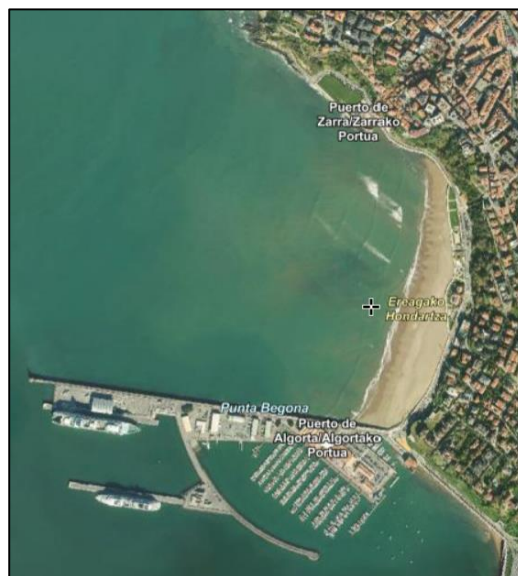


Figura 8.- Fotografía aérea de la playa de Ereaga (INT1), extraída del ICN.

2.2.6.- Playa de Arrigunaga (INT2)

La playa de Arrigunaga se sitúa en el municipio de Algorta, al norte de la localidad de Gexto. Así como la playa de Ereaga, Arrigunaga se encuentra en la zona interior del estuario del Nervión, en la desembocadura de la ría. Se trata de una playa de carácter urbano con una longitud de 628 metros. Cabe destacar que la localización del instrumento fondeado frente a esta playa constituye el punto fijo de referencia (PFR). En la figura 9 se muestra la fotografía aérea de la playa.

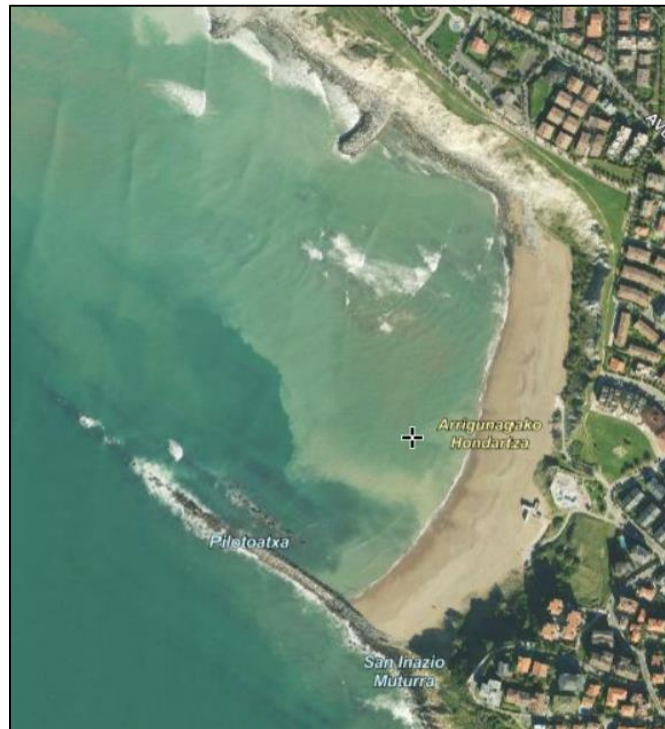


Figura 9.- Fotografía aérea de la playa de Arrigunaga (INT2), extraída del ICN.

3.- Metodología: Descripción de campañas de campo y modelado numérico

A lo largo de este apartado se expone la metodología para realizar simulaciones numéricas del oleaje del Puerto de Bilbao y las playas adyacentes. Primero de todo, se presentan brevemente las campañas de campo realizadas dentro del marco del proyecto encargado por la APB al LIM/UPC, junto con los métodos e instrumentos utilizados. A continuación, se describe el estado del arte y las bases teóricas del modelado del oleaje en el que se basa SWAN. Estos modelos permiten comprender las variaciones que se producen en la superficie libre del mar y, de esta manera, realizar predicciones sobre su evolución en diferentes horizontes temporales. Así mismo, se expondrán las ecuaciones de gobierno del software utilizado para el caso de estudio descrito anteriormente, así como sus esquemas numéricos y sus limitaciones. Finalmente, se exponen la obtención de la batimetría, la generación de las mallas de cálculo, y los parámetros principales introducidos en el programa.

3.1.-Campañas de campo

Tal y como se ha introducido previamente, la presente tesina toma como referencia los trabajos de caracterización hidrodinámica de la zona de estudio dentro del proyecto *Asistencia técnica para el seguimiento ambiental del proyecto de extracción de arenas en el sector norte de la zona II de la APB (2016-2020) con especial vinculación al proyecto del espigón central*. Esta asistencia técnica incluye, además de la caracterización hidrodinámica, el análisis de la evolución morfodinámica de las playas de estudio. Para ello, se llevaron a cabo una serie de campañas de campo con el fin de obtener datos *in situ* para su posterior análisis y modelado. A continuación, se exponen los principales detalles de los trabajos realizados, así como los medios empleados, y la descripción de los resultados obtenidos, que se presentarán más adelante. Cabe destacar que, debido a la autonomía limitada de las baterías de los instrumentos utilizados, han sido necesarias varias campañas de campo, por lo que se expone un resumen genérico de las actividades realizadas.

3.1.1.- Instrumentación y fondeos

A lo largo de las diferentes campañas, se instalaron equipos de medida autónomos con el soporte logístico proporcionado por la APB, consistente en el buque de apoyo “Almirante Churruca” y un equipo de submarinistas. La localización de los fondeos, así como la profundidad local de los instrumentos (tabla 1), puede consultarse en la descripción de la zona de estudio del Capítulo 2. Tal y como se ha mostrado anteriormente, los instrumentos fueron situados frente a las playas del interior y entorno del Puerto de Bilbao, en puntos situados en zonas al abrigo de la navegación, y fueron debidamente validados con anterioridad por la Autoridad Portuaria de Bilbao.



Figura 10.- Buque de apoyo “Almirante Churruca”

En cada uno de los puntos de medida se recogieron datos de velocidad y dirección de corriente cada 10 minutos en capas de distinto grosor (según el equipo), distribuidas desde el fondo hasta la superficie. Así mismo, también recogieron datos horarios de altura y dirección del oleaje. En concreto, los instrumentos empleados fueron:

- 5 perfiladores acústicos de corrientes con capacidad de determinar oleaje direccional de la marca NORTEK, modelo AQUADOPP 600KHz (Ver figura 11)
- 1 perfilador acústico de corrientes con capacidad de determinar el oleaje direccional de la marca NORTEK, modelo AQUADOPP 2MHz (Ver figura 12).
- 1 perfilador acústico de corrientes y medidor del oleaje de la marca NORTEK, modelo AWAC 1MHz (Ver figura 13).

Estos instrumentos, junto con otros elementos auxiliares (contenedores de baterías, sistemas de localización y recuperación, se montaron sobre estructuras de acero diseñadas y construidas a tal propósito. A fin de conferirles suficiente peso como para soportar la acción del oleaje en profundidades reducidas, las estructuras fueron ancladas en losas de hormigón. Dichas losas, facilitadas por la APB, tenían un peso aproximado de 2800kg en aire y 1800Kg una vez sumergidas, y están provistas de cáncamos y estrobos de cable de acero para facilitar las maniobras.

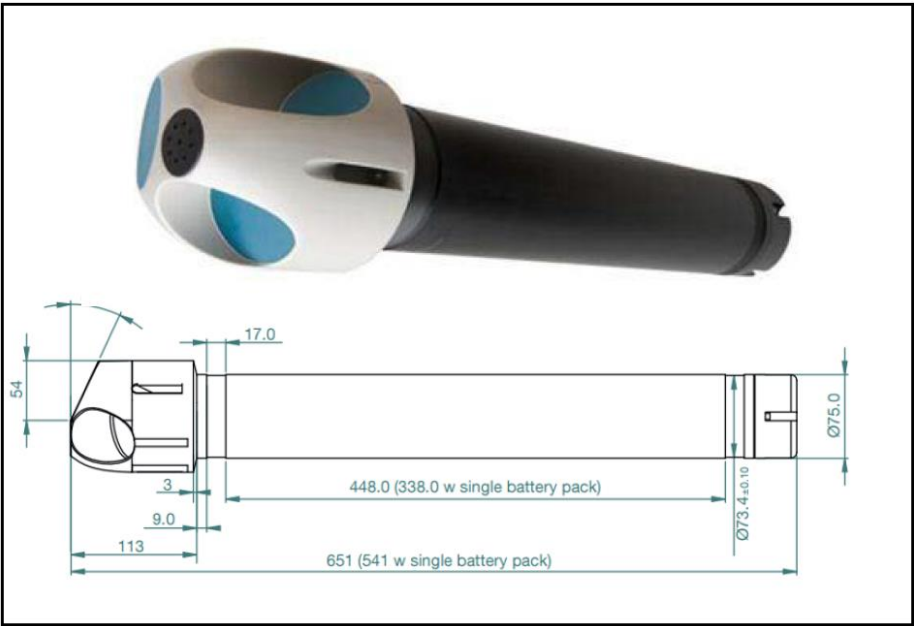


Figura 11.- Instrumentos empleados, NORTEK AS – AQUADOPP 600KHz

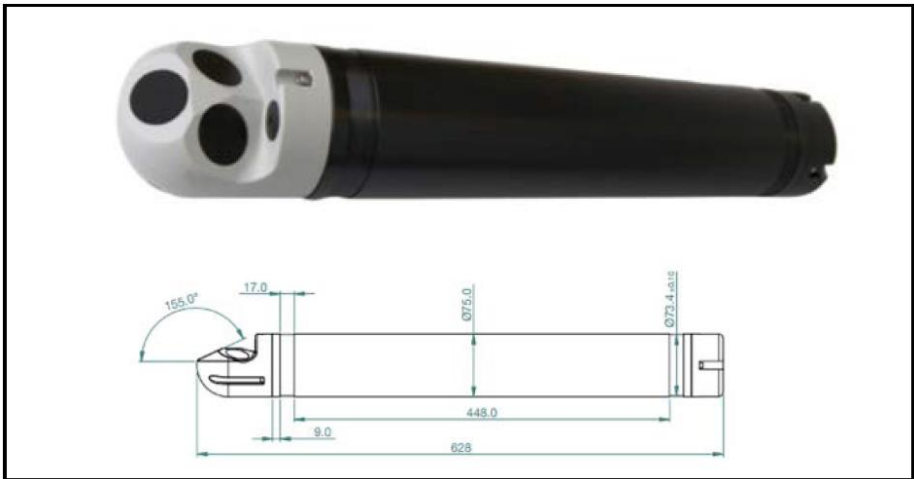


Figura 12.- Instrumentos empleados, NORTEK AS – AQUADOPP 2MHz

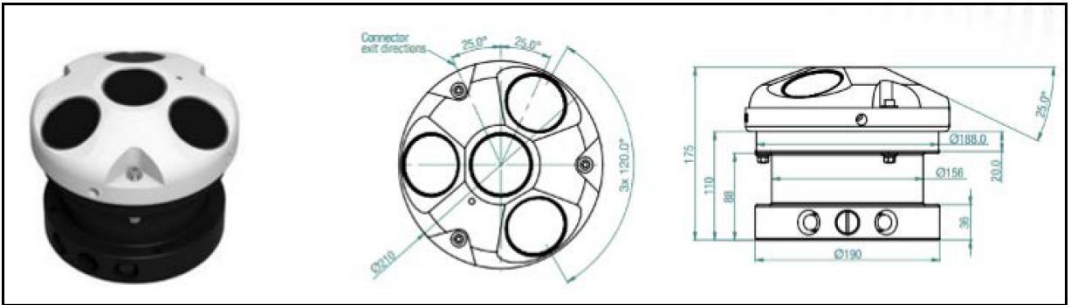


Figura 13.- Instrumentos empleados, NORTEK AS – AWAC 1MHz

Una vez ancladas las estructuras de soporte de los instrumentos a las losas de hormigón (ver figuras 14 y 15), éstas se dispusieron sobre la cubierta del buque de apoyo. La maniobra de instalación consistió en situar la embarcación sobre el punto previsto de fondeo y en el arriado de la losa mediante el pórtico de popa y el chigre principal. Las posiciones definitivas de los instrumentos se tomaron desde la popa, con el cable a pico, justo en el momento en que la losa reposaba sobre el fondo. El instrumento utilizado para el posicionamiento fue un dispositivo GPS de la marca GARMIN, con datum WGS84.



Figura 14.- Detalle de las estructuras de soporte ancladas a las losas de hormigón, con los equipos instalados en su interior, preparadas para su fondeo.

El cable de la maniobra constaba de dos secciones unidas por un grillete, de modo que al reposar la losa en el fondo se podía desconectar esta unión y sustituirla por un boyarín de marca, el cual quedaba flotando en superficie y desconectada del buque. De esta manera, el barco podía separarse de la posición y permitir al submarinista una inmersión segura con el fin de comprobar la horizontalidad de la losa, las características del fondo, y desconectar el cable de maniobra (con el boyarín) de los estrobos de la losa. Finalmente, se recuperaba el boyarín con el cable de maniobra.



Figura 15.- Detalle de las losas de hormigón dispuestas en cubierta durante la operación de fondeo.

De modo complementario a la instalación, la maniobra de recuperación se inicia con la señalización de la posición de fondeo. Ello se realiza mediante la activación por pulso acústico desde superficie del sistema de localización instalado en los fondeos. Dicha activación conlleva la liberación de una boya de marca que queda unida al fondeo mediante una línea de seguridad. De esta manera, la boya queda flotando en superficie y el submarinista puede aproximarse a la estructura sumergida siguiendo la línea marcada por el cable. En caso que el sistema no funcione correctamente, se procede a balizar el punto con un boyarín a partir de la posición obtenida en el GPS desde la embarcación ligera del submarinista. Una vez que éste se sumerge y localiza el fondeo, procede a conectar la sección de cable de maniobra con su boyarín, el cual es recuperado desde la embarcación de apoyo y se conecta al cable del chigre principal para proceder a su izado.

A fin de minimizar el balanceo y facilitar el embarque de la losa por el pórtico, se engancha un segundo cable a los estrobos de la losa una vez ésta se encuentra en superficie, y se tira de él desde el segundo chigre. Cabe destacar que se requiere una gran coordinación entre ambos chigres para poder efectuar la recuperación segura de los instrumentos (ver figura 16).



Figura 16.- Detalle de las operaciones de recuperación de los instrumentos fondeados.

Aunque los datos obtenidos se consideran generalmente satisfactorios, debido a la irregularidad del medio marítimo, durante el análisis de la información recopilada debe tenerse en cuenta las posibles incidencias ocurridas. En cada uno de los informes de campaña redactados por el equipo técnico del proyecto se incluyen las incidencias acaecidas en los periodos de fondeo, así como una serie de recomendaciones para futuras campañas, que puede consultarse para mayor detalle.

Sin embargo, existen unas directrices generales a seguir en las operaciones de campo, que es interesante recalcar en este trabajo de final de grado:

- Durante las maniobras de instalación/recuperación es recomendable trabajar con condiciones de mar favorables, seleccionadas en base a la experiencia acumulada en la zona de estudio. En el caso de la costa de Bilbao, podría establecerse, tentativamente, un límite de oleaje inferior a 1 metro, y una velocidad de viento inferior a 10 kn.
- Las estructuras de los instrumentos deben asegurarse sobre un lecho lo más uniforme y arenoso posible, a fin de evitar movimientos debidos a la acción del oleaje en situaciones de temporal.
- Asimismo, debiera realizarse una comprobación exhaustiva de la horizontalidad de la posición de las losas de hormigón en el momento de su fondeo. Y si fuera preciso, modificar su posición a fin de garantizar una correcta colocación.
- Para evitar el movimiento de las losas durante episodios de tormenta, debería estudiarse en detalle las modificaciones de éstas en cuanto al peso o los anclajes. Para ello, debe tenerse en cuenta el aumento de complejidad en las maniobras de fondeo y desfondeo.

De modo complementario a estas recomendaciones, también se debe garantizar que los submarinistas conocen los detalles de las maniobras y, en particular, cómo debe ser la disposición de los cables de sujeción de la losa de hormigón durante el fondeo/desfondeo y una vez que finaliza la instalación. Además, también es importante advertir a las cofradías de pescadores de la localización de los fondeos, así como el día en que se van a realizar las maniobras con los equipos, para evitar la presencia de aparejos de pesca en las proximidades. De esta manera, se puede prevenir posibles desperfectos en las instalaciones y también garantizar la seguridad del personal.

3.2.-Propagación del oleaje

El comportamiento del oleaje puede describirse de manera simplificada mediante la teoría lineal del oleaje. Sin embargo, el oleaje real es un proceso estocástico tanto en alturas como en longitudes de onda y direcciones, tal y como se verá a lo largo de este apartado. Esto es debido a que el oleaje se genera como respuesta a la acción del viento sobre la superficie libre del mar, y a otras condiciones atmosféricas no estacionarias [20]. Es decir, tiene un forzamiento meteorológico y consecuentemente irregular.

Si se observan las fases iniciales del proceso de generación del oleaje, se puede apreciar la irregularidad en las ondas producidas, tanto en sus longitudes de onda como en direcciones de

propagación. Esta primera situación de formación del oleaje se conoce como mar de viento, u oleaje tipo *sea*. A medida que el oleaje madura, se desarrolla y propaga (debido a su naturaleza dispersiva, que se mostrará más adelante), y se ve sometido a fenómenos de dispersión y disipación de energía que alteran sus características. Debido a ello, el oleaje va adoptando direcciones de propagación y longitudes de onda preponderantes, y ya fuera de la zona de generación y dadas sus características, se conoce como mar de fondo, u oleaje tipo *swell*. La relación de dispersión permite diferenciar estas dos situaciones del oleaje, ya que describe la forma en la que un campo de oleaje con muchas frecuencias se separará o dispersará debido a las diferentes celeridades de las frecuencias componentes. La relación de dispersión tiene la siguiente forma:

$$\omega^2 = gk(\tanh(kh)) \quad [\text{Ec. 1}]$$

Con:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{y} \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

ω : fase de la ola h : profundidad

g : gravedad T : periodo

k : número de onda L : longitud de onda

De acuerdo con la relación de dispersión, se deduce que, a mayor período, mayor es la longitud de onda y la velocidad de propagación. Además, a medida que el oleaje se propaga, en términos de longitud de onda y periodo, su espectro se hace más estrecho. Por esto motivo, al comparar los espectros del oleaje tipo *sea* y el oleaje tipo *swell* puede observarse que el oleaje tipo *sea* es de banda ancha, debido a que en la zona de generación se da una gran cantidad de frecuencias y direcciones. Así mismo, el oleaje tipo *swell*, al propagarse, se “regulariza”, por lo que se obtiene un espectro de energía de banda estrecha. Esta casuística queda reflejada en la figura 17, que sirve como ejemplo para entender las diferencias entre estos tipos de oleaje.

El oleaje que se genera en aguas profundas, se puede modelar fácilmente con modelos de tercera generación, mediante la introducción de los campos de vientos. Estos modelos se basan en la resolución de la ecuación de balance de energía, a la que se le pueden añadir los efectos del asomeramiento o *shoaling*, la refracción, y la fricción del lecho marino que se dan en aguas continentales. Estos modelos, como en el caso del programa WAM, dan resultados con una buena precisión en aguas profundas y escalas oceánicas. Sin embargo, en escalas menores, de mayor resolución, como en las zonas costeras y con presencia de obstáculos, estos resultados pueden distorsionarse.

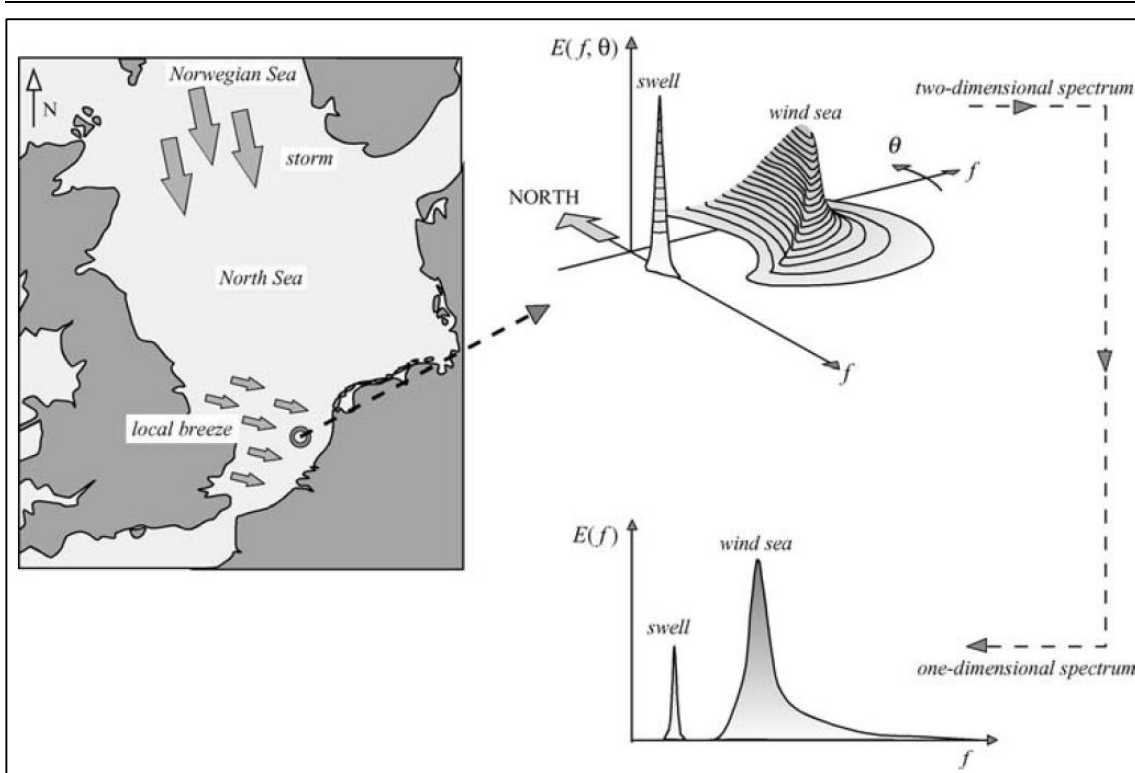


Figura 17.- Ejemplo de la interpretación del espectro de los oleajes tipo *sea* y *swell* generados en el mar del Norte (Fuente: Holthuijsen, 2007)

Para obtener el modelo de oleaje del puerto de Bilbao y las playas adyacentes se ha utilizado el modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*, por sus siglas en inglés), herramienta creada por la *Faculty of Engineering and Geosciences* de la *Delft University of Technology*. A diferencia de otros modelos, SWAN calcula la propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona de surf, en aguas someras, sin ninguna restricción, *a priori*, en la evolución del espectro de energía del oleaje. No obstante, aunque SWAN se ha concebido para zonas costeras, mediante la formulación de coordenadas cartesianas, también permite el modelado del oleaje en escalas oceánicas con coordenadas esféricas [20].

3.3.-Ecuaciones de gobierno

El oleaje producido por el viento se caracteriza principalmente por sus alturas de olas y periodos irregulares, debido a la naturaleza irregular del propio viento. Por ello, la superficie del mar se encuentra en continuo cambio, lo que hace inviable describir con una aproximación determinista la superficie marina. Por otra parte, las propiedades estadísticas de la superficie libre, como la altura de ola media, los periodos y direcciones, tienden a variar lentamente en tiempo y espacio, comparado con los periodos y longitudes de onda habituales. La elevación de la superficie del mar en cualquier lugar y momento pueden ser observados como la suma de muchas ondas armónicas (ecuación nº 3). Cada una de estas ondulaciones ha sido generada por el viento a diferentes espacios y tiempos. Por lo tanto, son estadísticamente

independientes desde su origen. De acuerdo con la teoría lineal del oleaje, permanecen independientes durante su travesía a lo largo de su recorrido por el mar [20]. La perturbación de la superficie del mar en un punto puede describirse como:

$$\eta(t) = \sum_i a_i \cos(\sigma_i t + \alpha_i) \quad [\text{ec. 3}]$$

Donde:

η : elevación de la superficie del mar

a_i : amplitud de la i -ésima ola

σ : frecuencia angular relativa de la i -ésima ola con presencia de corrientes

α_i : fase aleatoria de la i -ésima ola

3.4.-Modelado con SWAN

Las simulaciones que se producen con SWAN se basan en el espectro de energía del oleaje. Esto es debido a que la oscilación de la superficie del mar en un punto concreto no puede representarse como una función sinusoidal, si no como un conjunto de ondas irregulares. SWAN aproxima este oleaje irregular como la suma de olas regulares, con diferentes periodos y direcciones, representada como el espectro del oleaje [17]. Con este espectro de oleaje es posible representar la distribución de la densidad de energía sobre las frecuencia, σ , y las direcciones de propagación, θ , es decir, $E = E(\sigma, \theta)$. La densidad de energía (E) tiene la siguiente forma de la ecuación nº 4:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad [\text{ec. 4}]$$

Donde:

ρ : densidad del agua

g : gravedad de la Tierra

H : altura de ola

Por consiguiente, las funciones de densidad de energía permiten describir espectralmente los parámetros del oleaje, que son: la altura de ola significativa (H_s), el periodo pico (T_p), y la dirección (θ).

Sin embargo, el modelo de oleaje utilizado determina la evolución de la densidad de acción $N(x, t; \sigma, \theta)$ en espacio x y tiempo t . La densidad de acción se define como:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad [\text{ec. 5}]$$

Esto se debe a que la densidad de acción N (ecuación nº 5) se conserva a medida que se propaga el oleaje, incluso con presencia de corrientes marinas, mientras que la densidad de energía no lo hace [15].

La evolución de la densidad de acción N se rige por la ecuación de balance de la acción (ecuación nº 6), que se define como:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad [\text{ec. 6}]$$

El primer término a la izquierda de la ecuación corresponde a la parte cinemática, siendo el rango de cambio local de la densidad de acción en el tiempo. El segundo y tercer término, representan la propagación de la energía del oleaje en el espacio, con las velocidades de propagación c_x y c_y en x e y respectivamente. El siguiente término denota el cambio de las frecuencias relativas debidas a las variaciones de la profundidad y de las corrientes, con la velocidad c_σ en el espacio espectral (σ, θ) . El quinto término representa la refracción inducida por el lecho marino y las corrientes. Las expresiones de las velocidades de propagación se toman de la teoría lineal del oleaje (Dingemans, 1997; Whitham, 1974). En el lado derecho de la ecuación se encuentra el término S_{tot} (ecuación nº 6), denominado término fuente en términos de la densidad de energía, y que representa todos los procesos físicos que generan, disipan, o redistribuyen la energía del oleaje:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad [\text{ec. 7}]$$

Donde:

S_{in} : Aportación de energía del viento a las olas

S_{nl} : Interacciones no lineales entre olas (triadas y cuádruplets)

S_{ds} : fenómenos de disipación (fricción con el lecho, rotura y *whitecapping*)

En aguas someras, la expresión anterior (ecuación nº 7) puede reescribirse como:

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl3} + S_{nl4} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} \quad [\text{ec. 8}]$$

Donde:

S_{in} : Aportación de energía del viento a las olas

S_{nl3} : Interacciones no lineales producidas por las triadas

S_{nl4} : Interacciones no lineales producidas por los cuádruplets

$S_{ds,w}$: Disipación producida por el *whitecapping*

$S_{ds,b}$: Disipación producida por la fricción con el lecho marino

$S_{ds,br}$: Disipación producida por la rotura de la ola

3.5.-Esquemas numéricos

A continuación, se expone brevemente los métodos numéricos empleados por SWAN durante las simulaciones. La información presentada, así como el conocimiento de los conceptos mencionados, pueden hallarse en la documentación técnica redactada por el equipo de SWAN [19][20][21].

Los modelos de oleaje de tercera generación permiten el desarrollo del espectro del oleaje sin ninguna restricción. Ello provoca un cálculo de mayor dificultad debido a las múltiples escalas temporales asociadas a todas las frecuencias de las olas a modelar. Esto representa un reflejo de la naturaleza física de las olas generadas por el viento, con un amplio rango de frecuencias. Para poder realizar correctamente el cómputo de las olas de mayor frecuencia se requiere un intervalo de tiempo muy reducido. Consecuentemente, el valor reducido de este intervalo de tiempo se traduce en una menor economía del coste de computación. Por esta razón, SWAN hace uso de una aproximación denominada *frequency-dependent under-relaxation* para reducir este coste computacional [10].

La discretización de la ecuación de balance de acción del oleaje en SWAN, se realiza mediante el método de diferencias finitas, con una discretización temporal usando la técnica implícita de Euler. Para la discretización en el espacio geográfico, SWAN utiliza una malla rectangular con un tamaño de celda constante Δx y Δy . Los tres esquemas numéricos con los que SWAN permite trabajar son:

- BSBT (*Backward Space, Backward Time*)
- S&L (*Stelling and Leendertse, 1992*)
- SORDUP (*Rogers et al., 2002*)

El primero de todos, es un esquema de primer orden, usado para casos estacionarios y no estacionarios. Este resulta muy robusto, pero también muy difusivo para tiempos de cálculos mayores, i.e., se obtienen datos con menor exactitud. Sin embargo, esto no se considera un problema grave, ya que se usa en distancias cortas.

El esquema S&L, de segundo orden, es utilizado para casos no estacionarios, con una menor difusión.

Por último, el esquema SORDUP, también de segundo orden, es el método utilizado por defecto para los cálculos estacionarios.

Finalmente, la discretización en el espacio espectral se lleva a cabo mediante intervalos equivalentes para la dirección $\Delta\theta$, con una escala logarítmica de frecuencias $\Delta\sigma/\sigma$ y se computa con un esquema híbrido *central/upwind*.

3.6.-Limitaciones

Aunque SWAN se puede usar en cualquier escala relevante para ondas gravitacionales producidas por el viento, el programa está diseñado específicamente para aplicaciones costeras que no requieran cambios significativos en su escala. Dado que el objeto de estudio de esta tesina es el de modelar el oleaje en una zona costera, esto no supondrá un problema añadido.

No obstante, los procesos de difracción pueden suponer errores considerables. Para ello, SWAN realiza su simulación mediante una aproximación de promediado de fase para reducir el error consiguiente. Se trata de una estimación basada en la ecuación de *mild-slope*, que comparado con los datos analíticos ofrece resultados aceptables en presencia de posibles obstáculos que puedan generar difracción o reflexión [11]. En el caso de los puertos, por ejemplo, que cuyas estructuras pueden provocar sendos fenómenos, los resultados son de gran interés en cuanto a la identificación de los puntos más afectados por las mayores alturas de ola.

Por último, SWAN no computa el oleaje inducido por corrientes en casos bidimensionales, sino que el cálculo se basa en ecuaciones aproximadas. Es decir, SWAN no tiene la capacidad de simular corrientes, pero puede calcular los procesos de refracción asociados a las mismas mediante la lectura de ficheros que contengan los datos de corrientes.

3.7.-Batimetría

A medida que el oleaje se propaga hacia el litoral, la profundidad disminuye. La implicación principal de este hecho es que el movimiento de las partículas de agua se ve condicionado por la fricción con el fondo, provocando una serie de fenómenos que se acentúan a media que se aproxima a la costa. Entre otros, destacan la refracción, la difracción, el asomeramiento (*shoaling*), y la disipación de energía por fricción con el fondo, provocados por esta disminución de profundidad. Por este motivo, es de especial interés conocer la morfología del lecho marino mediante una batimetría precisa.

Para el modelado del oleaje en el Puerto de Bilbao y las playas adyacentes, se ha recurrido a los datos batimétricos del portal web del EMODnet (*European Marine Observation and Data Network*, por sus siglas en inglés). EMODnet es un proyecto impulsado por la Unión Europea en forma de consorcio, en el que organismos oficiales, empresas y centros de investigación de los estados miembros aportan datos batimétricos para cubrir todas las superficies marinas de las aguas territoriales europeas, en el marco de una política marítima común. Además, también provee datos de diferente temática relacionada con el ambiente marino como, por ejemplo, geología, biología o hábitats, entre otros. En lo que se refiere a batimetría, la plataforma cuenta con un servicio abierto de visualización y descarga del modelo digital del terreno (MDT) del área de interés compuesto por los datos recopilados.

Los datos obtenidos del portal del EMODnet tienen una resolución de malla de $1/8 \times 1/8$ minuto de arco que se traduce en un tamaño de celda de aproximadamente 230 metros. Dado que el número de proveedores de datos ha ido incrementado y, de esta manera, corrigiendo posibles anomalías, en 2018 se publicó un MDT actualizado compatible con sistemas de información geográfica (GIS, por sus siglas en inglés). Aunque en el portal están disponibles ambas versiones, la más reciente cuenta con una mayor resolución de malla con $1/16 \times 1/16$ de arco de minuto, y un tamaño de celda aproximado de 115 metros [6]. Además, utiliza el sistema geodésico WGS 84 como datum, así como para la convención de coordenadas:

- X = longitud en grados decimales entre -180° y 180° , con el Este > 0 .
- Y = latitud en grados decimales entre -90° y 90° , con el Norte > 0 .
- La profundidad se expresa en metros > 0 , con dos decimales.

Tal y como se ha mencionado previamente, los datos batimétricos pueden presentar errores o incongruencias, para el caso de la zona de estudio se ha complementado con datos batimétricos obtenidos en las diferentes campañas de campo. A continuación, en la figura 18 se muestra la batimetría, ya corregida, utilizada en el presente trabajo:

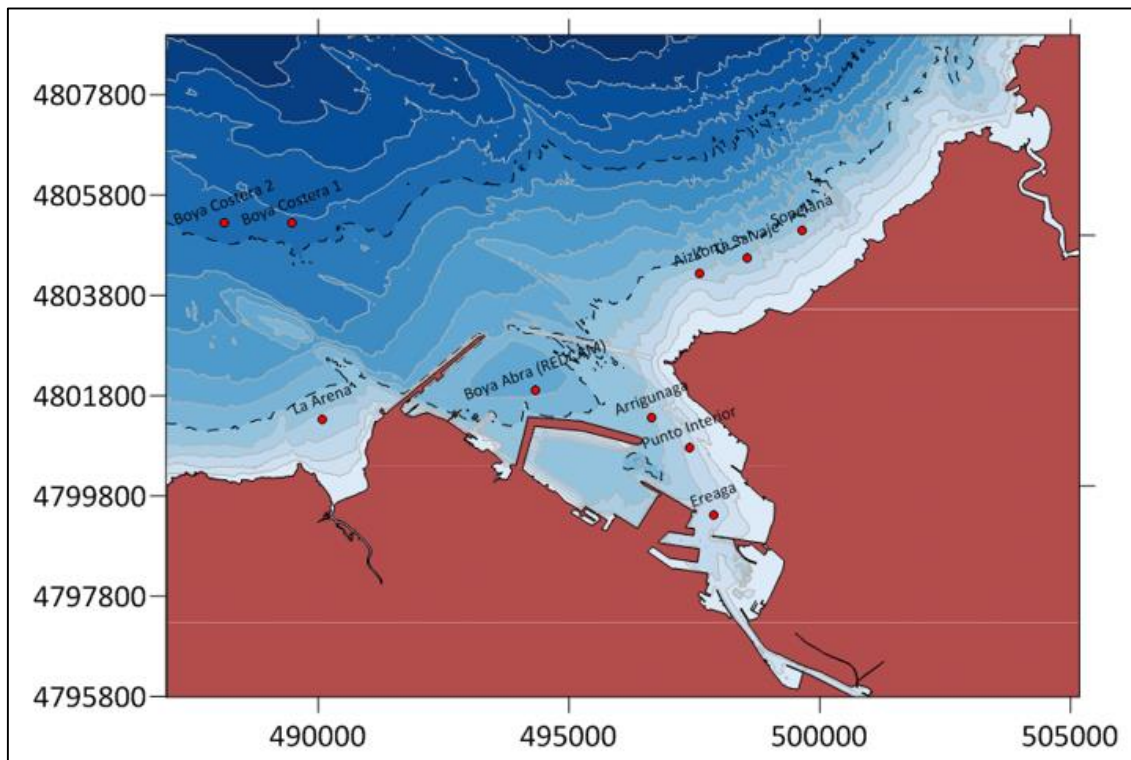


Figura 18.- Batimetría de la zona de estudio complementada con los datos batimétricos de las campañas de campo.

3.8.-Generación de las mallas

Dado que la batimetría que se encuentra disponible en el portal del EMODnet se basa en la recopilación de datos de diferentes organismos e instituciones, los datos pueden contener algunos errores. Tal y como se ha visto en el apartado anterior, estos datos fueron complementados con datos batimétricos obtenidos a bordo de las embarcaciones durante las campañas de campo. Estos datos tienen que ser procesados para acabar de depurar las incorrecciones que se presenten. Además, este procesamiento de los datos permitirá generar la malla de cálculo que se introducirá en SWAN.

Para el procesamiento de los datos de batimetría se ha utilizado el software Surfer (herramienta GIS), de Golden Software. Este programa permite elaborar diferentes tipos de cartografía mediante la introducción de las coordenadas x , y , z . A continuación, se muestran los pasos seguidos para la preparación de la malla de cálculo, acompañado de figuras ilustrativas. Estos corresponden a una malla con un tamaño de celda de 100x100. Sin embargo, tras probar diferentes tamaños, se utilizó una malla de cálculo de 50x50 que se consideró que tenía suficiente resolución.

Al iniciar Surfer, se abre el archivo que contiene la batimetría de la zona con sus coordenadas x , y , z , que forman una malla regular. A esta malla se le puede aplicar valores de Δx y Δy , que se traducen en un mayor o menor número de nodos, que el usuario considere conveniente. Habitualmente, suelen usarse valores redondeados para evitar tener tamaños de celda con decimales y, de esta manera, obtener mallas más sencillas de manipular. A continuación, aunque el programa permite el cálculo de la malla mediante diversos métodos, en este trabajo se ha considerado la triangulación con interpolación lineal para la batimetría.

Cabe destacar que, el método de triangulación mediante interpolación lineal, genera triángulos entre los puntos que se encuentran dentro del dominio de la triangulación. Sin embargo, es posible que haya puntos que se encuentren dentro de la malla, pero fuera de la triangulación. Dicho de otra manera, es posible que la malla contenga puntos sin datos información y, consecuentemente, el programa asigna un valor (en concreto, $1.70141 \times 10^{+38}$) a estos puntos conocidos como *no data* (sin datos). En la figura 19, se muestra un ejemplo gráfico de cómo se realiza la triangulación mediante interpolación lineal.

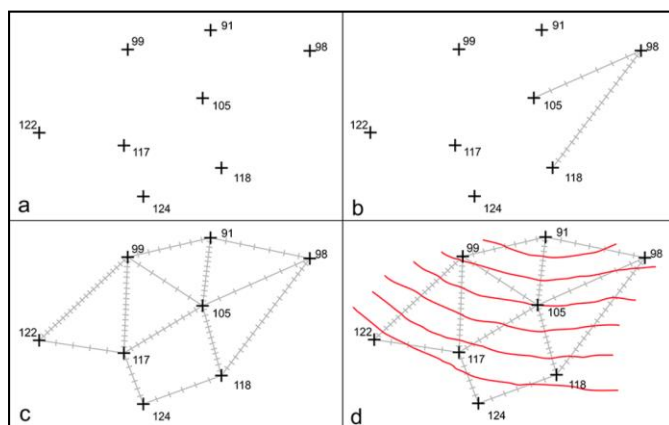


Figura 19.- Ejemplo gráfico de cómo se realiza la triangulación mediante interpolación lineal

En el caso de las batimetrías, estos puntos suelen corresponder puntos situados en tierra. Dado que los datos de interés son los de la profundidad del lecho marino, las mallas deben depurarse mediante la introducción de la línea de orilla. Esto se consigue con un fichero con datos $(x,y,0)$ que contiene las coordenadas de esta línea de orilla y, a continuación, se eliminan los datos espurios y todos aquellos datos dentro del límite de la misma línea de orilla. Este proceso se conoce como “blanqueo” de la malla.

Para este trabajo, se ha valido de la línea de orilla proporcionada durante los trabajos del proyecto de asistencia técnica, facilitando así el trabajo del autor y obteniendo una información más precisa. Este archivo se puede abrir con un editor de textos o con Excel para consultar las coordenadas que contiene, con un total de 26840 datos. En la figura 20, se muestra el resultado del proceso de “blanqueo” descrito anteriormente, y en el que se puede apreciar como los puntos terrestres se muestran de color negro. En cambio, los datos de batimetría se resaltan según una escala de color.

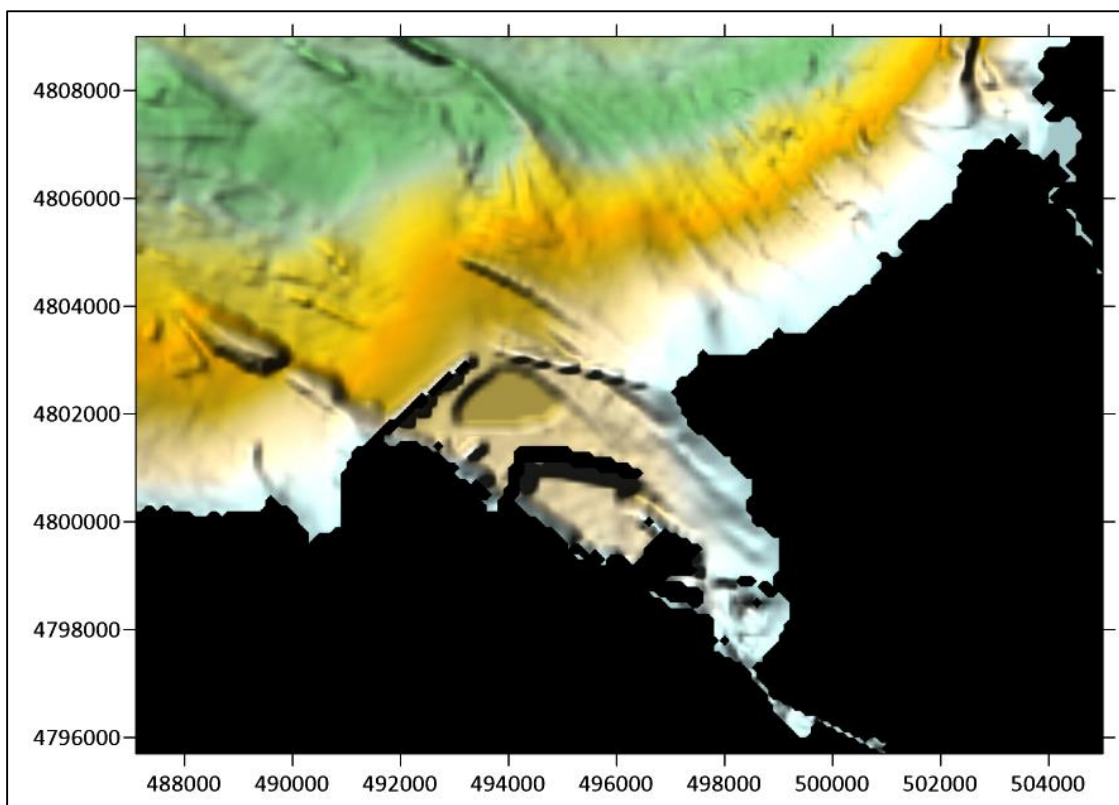


Figura 20.- Malla resultante tras el proceso de depuración de datos.

Una utilidad interesante de Surfer es que permite visualizar las mallas con la información de cada nodo, en el que se puede consultar los datos de elevación para cada uno. Además de visualizar estos datos, el programa también permite modificar los datos que contienen estos nodos, con lo que se pueden ajustar de manera precisa aquellos puntos que durante la interpolación lineal hayan podido dar resultados erróneos. Un ejemplo, puede ser el caso de algún dique pequeño, en el que la malla da valores de profundidad, interrumpiendo la continuidad del dique.

Cabe destacar que los datos de profundidad que se generan en la malla, pueden ser positivos o negativos, según el fichero de entrada. Sin embargo, el valor de las profundidades se puede modificar o especificar en SWAN. En la figura 21, se ilustra la manera en que se visualiza la malla con sus nodos en Surfer.

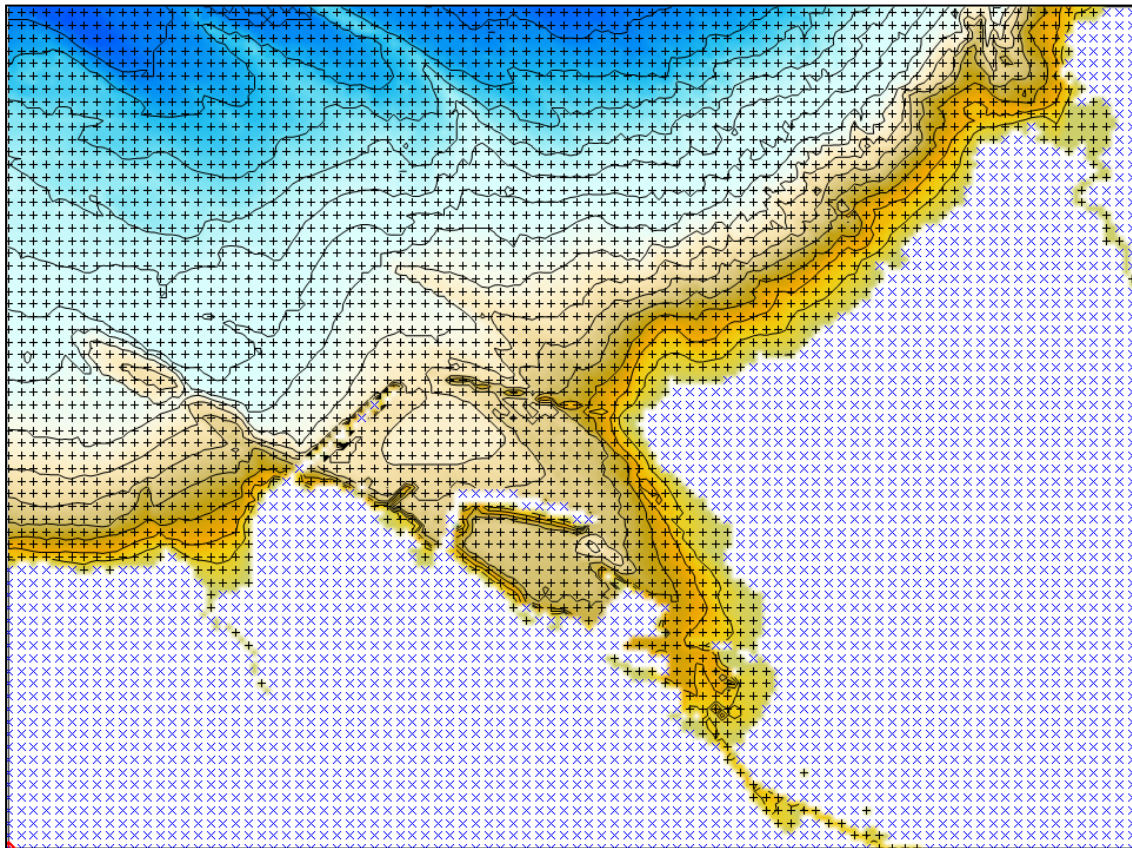


Figura 21.- Visualización de la malla de cálculo con los nodos que la conforman.

Una vez generada la malla, ésta debe guardarse como un archivo tipo ASCII, el cual contendrá la información de la malla en el encabezado, junto con las coordenadas que la forman. Uno de los datos que contiene, es el valor que se aplica en las celdas que no contienen datos (las de datos terrestres, diques, etc.), y que normalmente se trata de un número incómodo de manipular (habitualmente contiene una gran cantidad de decimales). Para facilitar la manipulación de estos datos, se sustituyen estos números dando un valor genérico de -9999 con la ayuda de un editor de textos, tal y como se muestra en la figura 22. Una vez reemplazados todos estos valores, se borra el encabezado formado por las 6 primeras filas, y se guarda el archivo con la extensión *.bot, que será el que se utilizará como malla de cálculo en SWAN.

De esta manera, con un archivo con coordenadas (x, y, z) se ha podido generar una malla con el programa Surfer, aplicando los límites que se han considerado adecuados (Δx y Δy). También se han corregido posibles incongruencias y se ha aplicado un valor de -9999 a todos los valores nulos. A partir de aquí, se ha podido generar el archivo de batimetría que servirá

como malla de cálculo en SWAN. Tal y como se ha comentado previamente, para generar mallas de diferente tamaño, sólo debe cambiarse los valores máximos y mínimos de la malla de batimetría para aplicar números fáciles de manipular, es decir, sin decimales y redondeados, para obtener tamaños de celda cómodos.

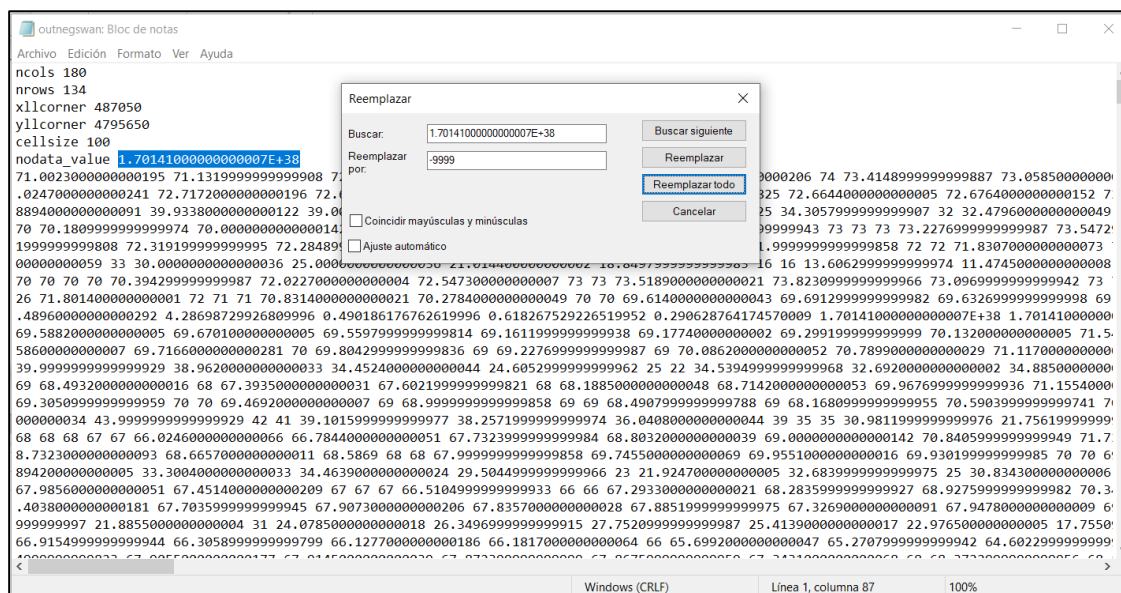


Figura 22.- Sustitución de los valores de los puntos que no contienen datos por el valor de -999

3.9.-Simulación en SWAN

Las simulaciones en SWAN se ejecutan mediante la lectura de un archivo (*script*) con extensión *.swn que contiene el código del programa, y que puede elaborarse con un editor de textos. Esto es debido a que el programa, al carecer de una interfaz gráfica, se trata de una consola tipo DOS (*Disk Operating System*, por sus siglas en inglés), en la que el *script* debe respetar la sintaxis y el orden de los comandos establecidos en el manual de usuario. En algunos casos no se requiere escribir los comandos, ya que el programa los ejecuta con los valores por defecto. En líneas generales, el *script* se divide en las siguientes secciones:

- Encabezado

Contiene los datos básicos del proyecto y pueden definirse los parámetros principales de entrada como: el nivel medio, la orientación del norte, la profundidad mínima que deseamos que calcule, o el valor de la densidad del mar, entre otros. Además, en esta sección puede configurarse el modo en que se desea que trabaje SWAN, que para este trabajo ha sido en dos dimensiones y no estacionario. Por último, puede definirse el tipo de coordenadas con las que trabajará (esféricas o cartesianas) y que en esta simulación ha sido con coordenadas cartesianas.

- Malla computacional

En esta sección, se define, básicamente, la malla computacional de la simulación. En ella se configuran los datos de las coordenadas de la malla, y se introduce el nombre del archivo que contiene la batimetría. Además, pueden configurarse las condiciones de viento o, si se dispone, puede introducirse un archivo que contenga los campos de vientos. También pueden añadirse los archivos con los *inputs* que correspondan para cada simulación.

- Condiciones iniciales y de contorno

En SWAN pueden definirse una serie de condiciones iniciales y de contorno según la necesidad. La definición de cada uno de estos comandos se halla en el manual de usuario de SWAN.

- Configuración de parámetros físicos y de métodos numéricos

SWAN calcula los parámetros físicos, que se describen en el manual de usuario, con los valores por defecto, sin necesidad de escribir cada uno de los comandos. Si se desea desactivar alguno de estos parámetros, debe escribirse la palabra *off* seguido del parámetro físico a anular. A continuación, puede configurarse el esquema numérico que se desee que ejecute SWAN.

- *Output*: archivos generados por el programa

Los archivos de salida o *outputs* que se generan como resultado de las simulaciones en SWAN pueden configurarse en esta sección. Por último, para finalizar la simulación, debe escribirse el comando *stop*.

En el *Anejo 1* de este trabajo, puede consultarse el script con el código utilizado para la simulación del oleaje de la zona de estudio. Toda la información de los comandos de cada una de las secciones se halla en el manual de usuario de SWAN.

4.- Resultados y discusiones

En este apartado se presentan, por una parte, los resultados que se obtuvieron de los instrumentos fondeados durante la campaña de campo de primavera de 2017, y que fueron utilizados para la simulación que se ha llevado cabo. Por otra parte, se exponen los resultados del modelo del oleaje de la zona de estudio en diferentes instantes de tiempo, ya que el modelo numérico se ha realizado en estado no estacionario. Finalmente, se mostrará una comparativa entre los datos medidos en las campañas de campo y los obtenidos en el modelado numérico. De esta manera, se podrá determinar la validación del modelo, en tanto en cuanto exista alguna correlación entre estos datos.

4.1.-Medidas de los fondeos

Los datos utilizados para esta tesina corresponden a la campaña de campo de primavera de 2017, tal y como se ha introducido previamente. Por este motivo, a continuación, se exponen gráficamente los registros de oleaje de este periodo, en el cual se puede observar 4 temporales destacables con alturas máxima de ola que llegaron a alcanzar los 6 metros. Además, también fueron medidos los datos de corriente que, aunque no forman parte del ámbito de estudio de este trabajo, puede consultarse en el informe de campaña. Para cada una de las playas (ver tabla 1 del capítulo2), se muestran 2 gráficas correspondientes a las alturas de ola significativa y máxima, y de dirección pico del oleaje (ver figuras 23, 24, 25, 26, 27).

- La Arena – ENT1

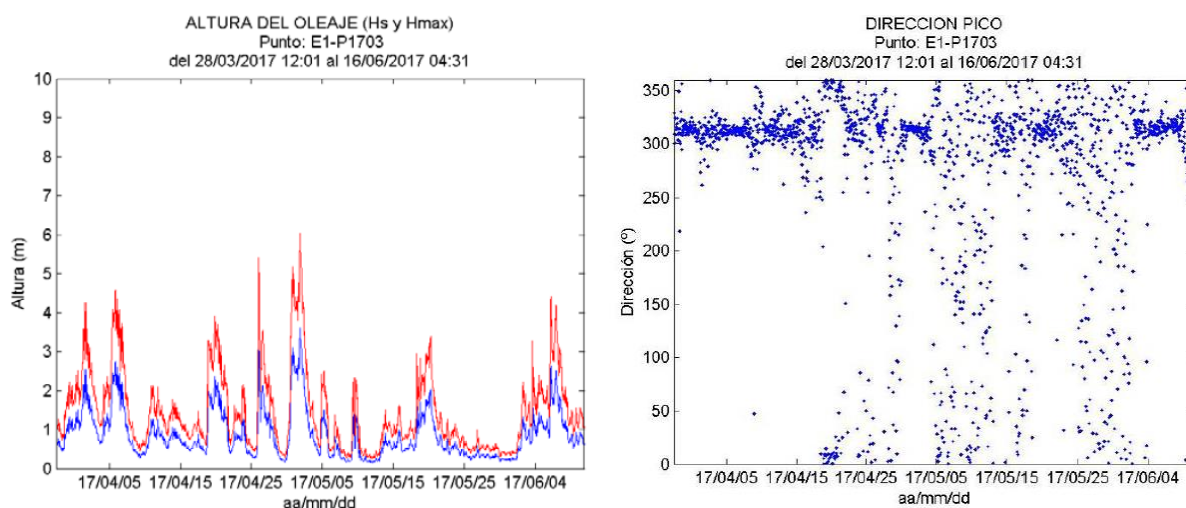


Figura 23.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en la Playa de la Arena. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.

- Aizkorri – ENT2

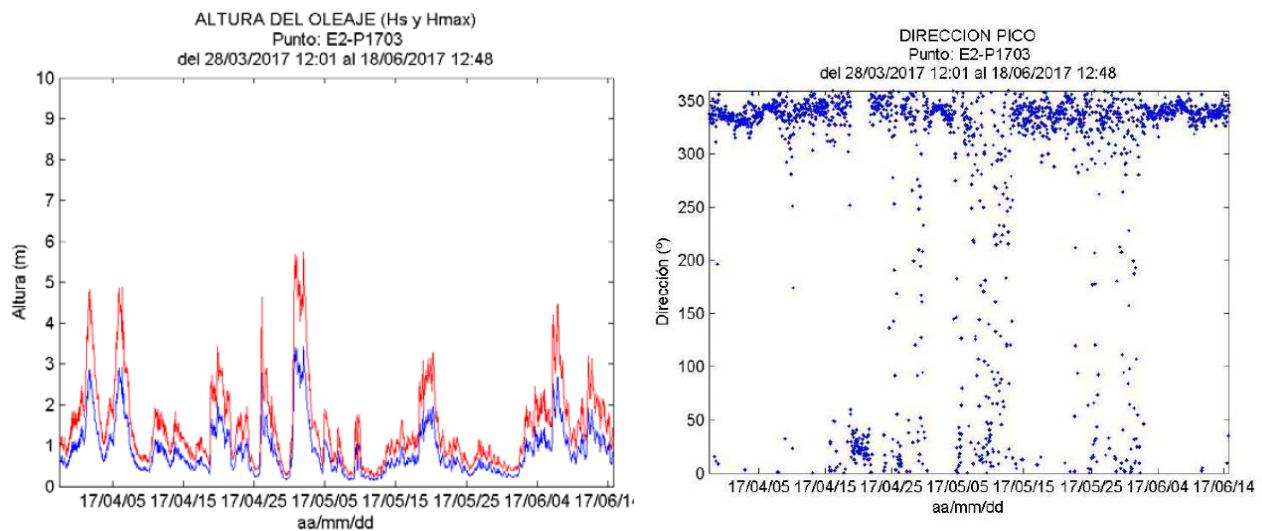


Figura 24.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (Hs) y altura de ola máxima Hmax, medidos y modelados en la Playa de la Aizkorri. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.

- Ereaga – INT1

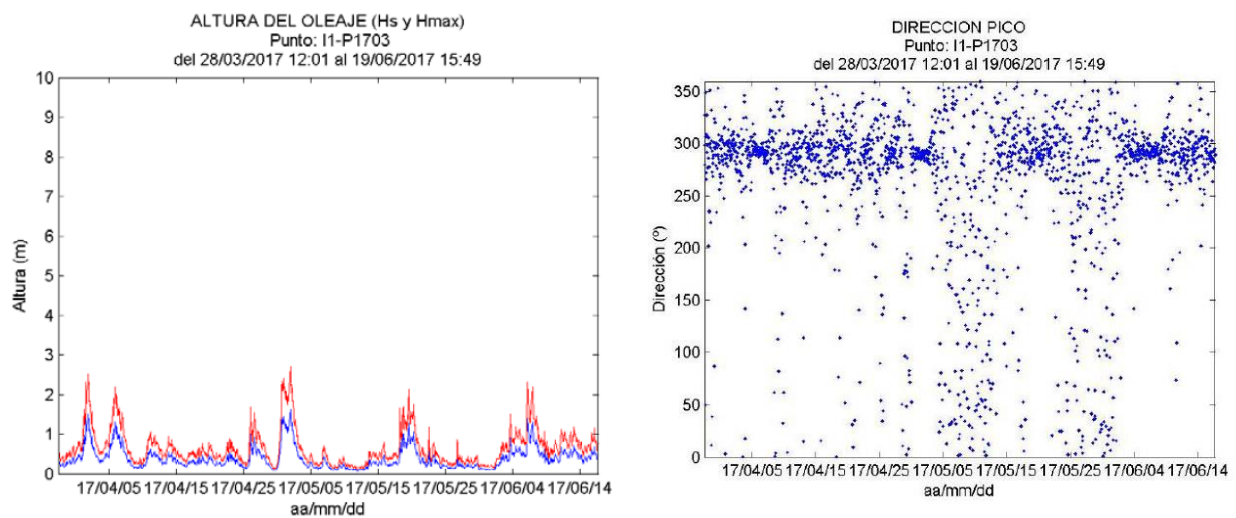


Figura 25.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (Hs) y altura de ola máxima Hmax, medidos y modelados en la Playa de Ereaga. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.

- Playa de Arrigunaga (PFR) – INT2

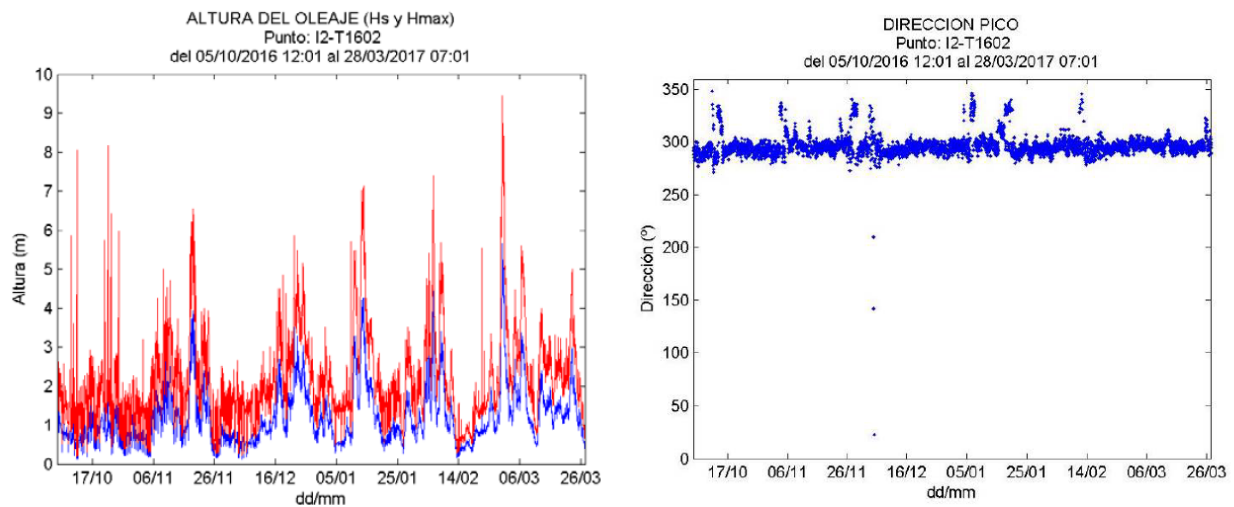


Figura 26.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en la Playa de Arrigunaga. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.

- Interior del Puerto – INT3

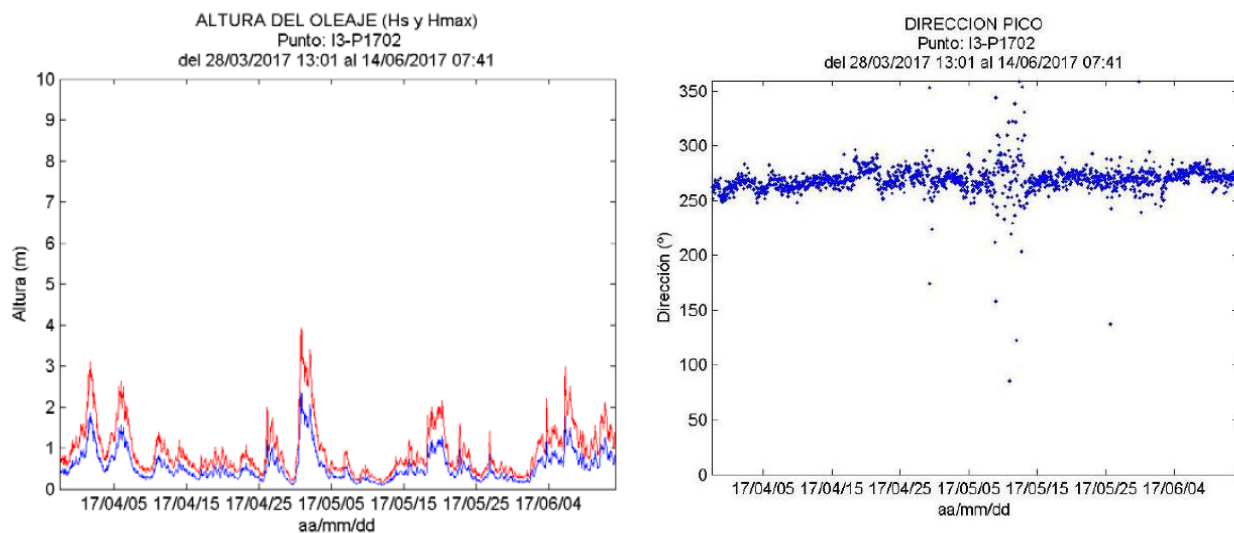


Figura 27.- A la izquierda se muestran los datos de altura de ola significativa (H_s) y altura de ola máxima H_{max} , medidos y modelados en el interior del Puerto de Bilbao. A la derecha de la imagen se muestran los datos de las direcciones pico del oleaje recopilados en este punto.

Cabe destacar que, para la campaña de primavera de 2017, los instrumentos fondeados en las playas de La Salvaje y Sopelana sufrieron algunos percances, por lo que estas observaciones quedan excluidas del análisis de resultados. En el primer caso, el sensor de presión dejó de funcionar en el momento en que el correntímetro entró en el agua, imposibilitando la obtención de datos de oleaje. En la playa de Sopelana, en cambio, el sensor de presión midió una profundidad de fondeo de unos 40 metros, cuando realmente fue fondeado sobre los 22 m. Este error en la medida de la profundidad también afecta a los datos de oleaje. Por otra parte, en el caso del equipo fondeado en la playa de Arrigunaga, tuvo que ser retirado en marzo de 2017, y en el momento del refondeo quedó con una inclinación excesiva.

La importancia de estas gráficas radica en su utilidad en cuanto a valorar la validación del programa SWAN para el modelado del oleaje en la zona de estudio. Esto será posible mediante la comparación entre estos datos medidos y los datos obtenidos del modelado, que se llevará a cabo a lo largo del capítulo dedicado a la interpretación de los resultados.

4.2.-Resultados del modelo

SWAN carece de una interfaz gráfica en la que se muestren los resultados, tal y como se ha comentado previamente. Sin embargo, SWAN genera una serie de ficheros con datos que pueden procesarse con programas de cálculo. Para el presente trabajo, los resultados obtenidos del modelo se han procesado con MATLAB.

La simulación obtenida corresponde a dos situaciones de tormenta que se dieron en la primavera de 2017, tal y como se refleja en los datos de altura de ola de la boyo costera de Puertos del Estado (figura 28). Concretamente al periodo comprendido entre el 16 y el 30 de abril de 2017, tal y como se puede comprobar en la figura 29.

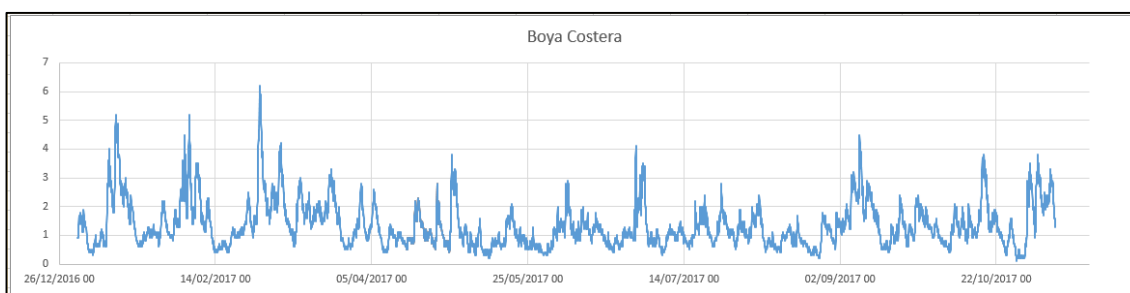


Figura 28.- Datos gráficos de altura de ola obtenidos en la boyo costera de Puertos del Estado.

En la en la figura 30 se muestra para cada una de las playas de la zona de estudio la comparativa entre los datos modelados en SWAN (línea roja) y los datos medidos (línea azul). Mediante la comparación entre estos datos, se podrá determinar la validez del modelo para la zona de estudio y las condiciones dadas.

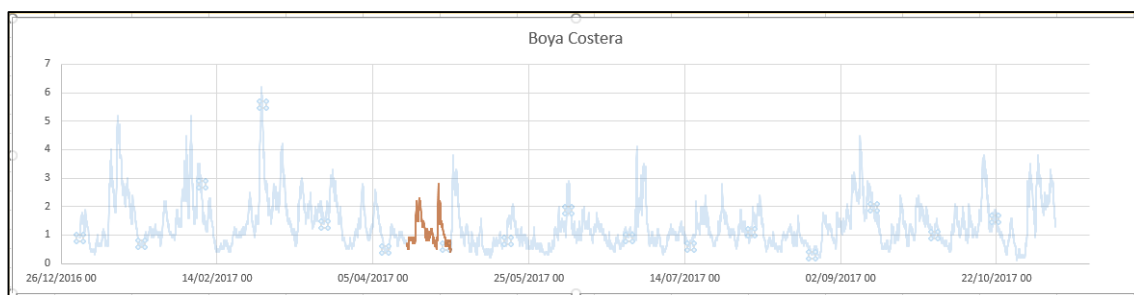


Figura 29.- En esta gráfica se destaca la tormenta que ha sido utilizada para realizar las simulaciones en SWAN, que se dio entre el 16 y 30 de abril de 2017.

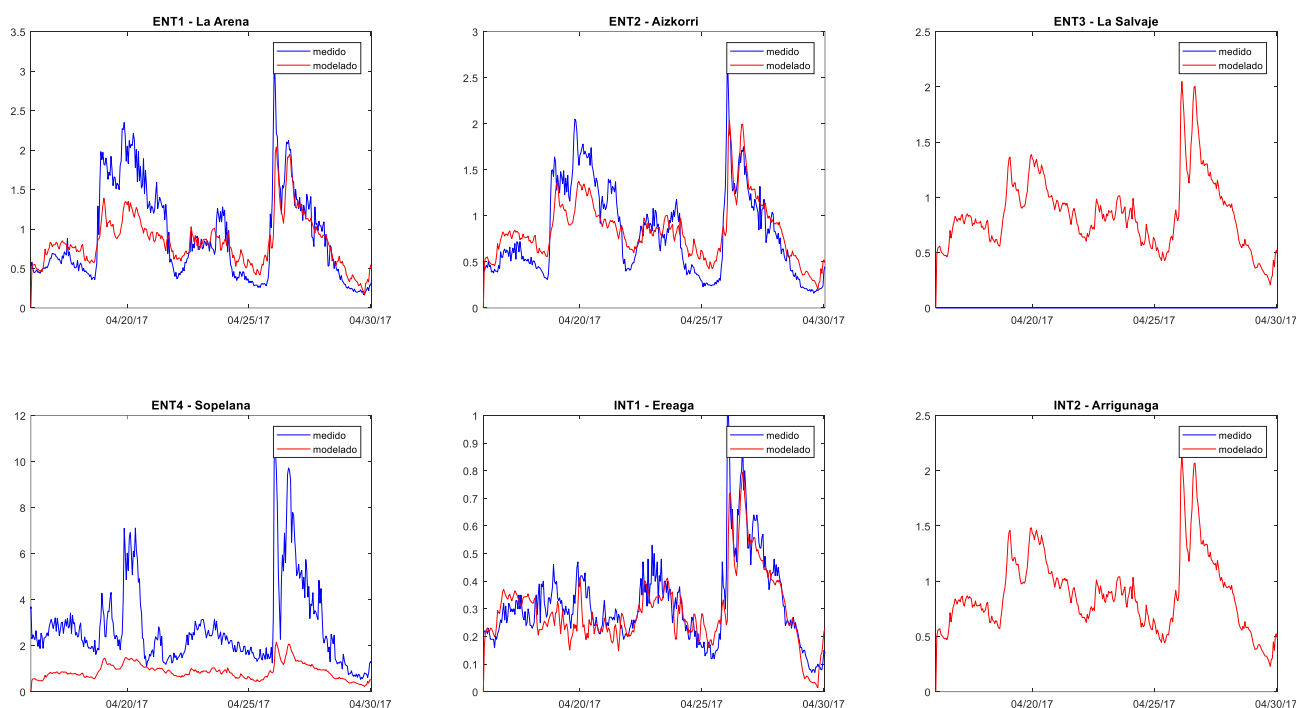


Figura 30.- Comparativa entre los datos medidos (en azul) y los datos modelados en SWAN (en rojo) para cada una de las localizaciones del ámbito de estudio.

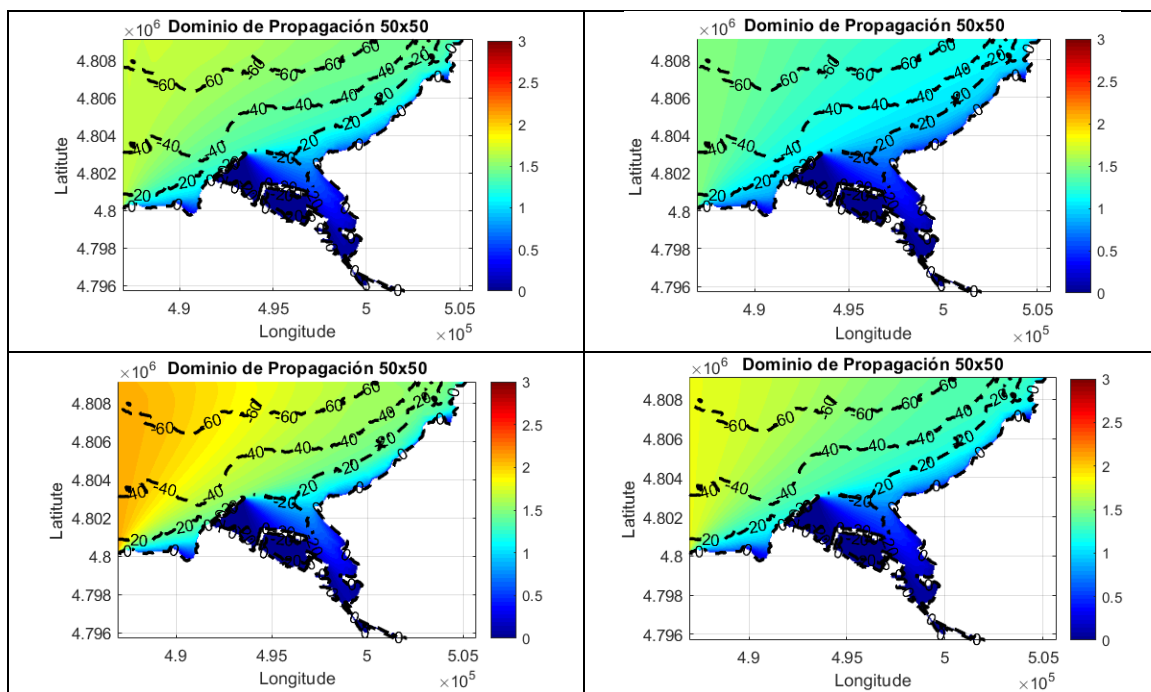
Cabe destacar que, tal y como se ha comentado anteriormente, en las playas de La Salvaje y Arrigunaga no hay datos de las medidas de los instrumentos. En el primer caso, fue debido a percances sufridos durante el periodo de fondeo que imposibilitó la obtención de datos. En la playa de Arrigunaga, en cambio, la instrumentación tuvo que ser desfondeada en marzo de 2017, por lo que para la campaña de primavera no pudo obtenerse los datos de oleaje correspondientes a abril del mismo año, en el periodo en que se simulan las tormentas.

En el caso de la playa de Sopelana, destaca que, cualitativamente, los datos de altura de ola medidos son muy elevados en comparación con los datos del modelo. Esto es debido a que, tal y como se expuesto previamente, los instrumentos aquí fondeados midieron una profundidad aproximadamente el doble de la real. Esta es la principal causa por la que del modelo se

obtiene un máximo del orden de 2 metros de altura de ola significativa, mientras que el instrumento de Sopelana presenta una medición que sobrepasa los 10 metros de altura.

Los resultados obtenidos del modelado numérico del oleaje en la zona de estudio, comparado con los datos medidos en las campañas de campo, se consideran cualitativamente satisfactorios. Sin embargo, para analizar la calidad de la simulación se deberá cuantificar el error entre ambos datos, tal y como se verá más adelante. Aunque en líneas generales el modelo sobrestima los valores bajos a partir de, aproximadamente, 1 metro de altura de ola, y a partir de este límite subestima lo medido. Además, puede apreciarse que, en los momentos iniciales de las tormentas, cuando empieza a recibir una aportación de energía mayor, al modelo le cuesta dar valores similares a los medidos. Pero a partir de que la tormenta se disipa y, por lo tanto, va disminuyendo la energía aportada, el modelo es capaz de obtener datos muy similares a los medidos. Estas tormentas pueden identificarse en las gráficas de manera visual, ya que corresponden a los dos momentos en que se producen los picos principales.

Dado que la simulación que se ha realizado ha sido en estado no estacionario, mediante MATLAB, se puede obtener una reproducción para cada instante de tiempo. Esta herramienta es de gran utilidad, ya que permite comprender las perturbaciones que se producen en la superficie del mar de manera sencilla. A continuación, en las figuras 31 y 32, se expone una serie de capturas secuenciales (de izquierda a derecha) de esta reproducción en la que se pueden apreciar las dos tormentas que se dieron durante el periodo de la simulación (ver figura 29). Para cada una de las tormentas se muestran los fotogramas de, aproximadamente, 30 horas de duración con intervalos de 5 horas entre fotograma. De esta manera, se pretende dar una idea de la evolución de estas tormentas, y las alturas de ola que se desarrollan, con especial interés en la situación que se da en las infraestructuras portuarias.



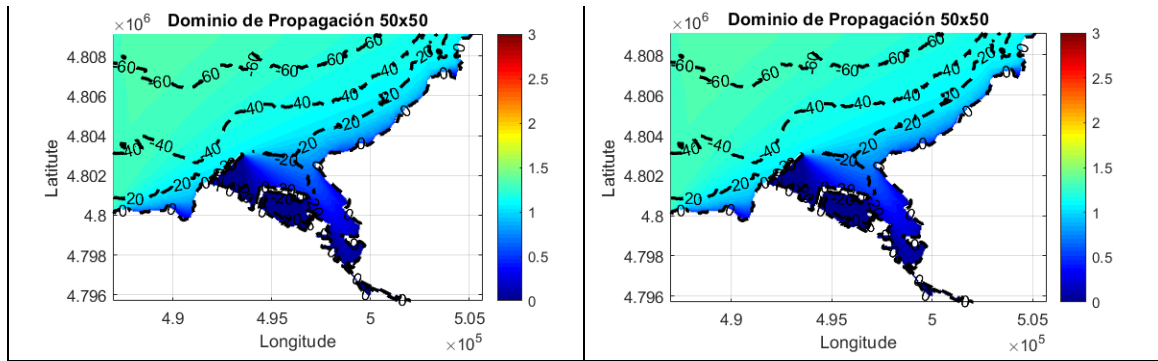


Figura 31.- Secuencia de la primera tormenta analizada, con intervalos de 5 horas aproximadamente entre fotogramas.

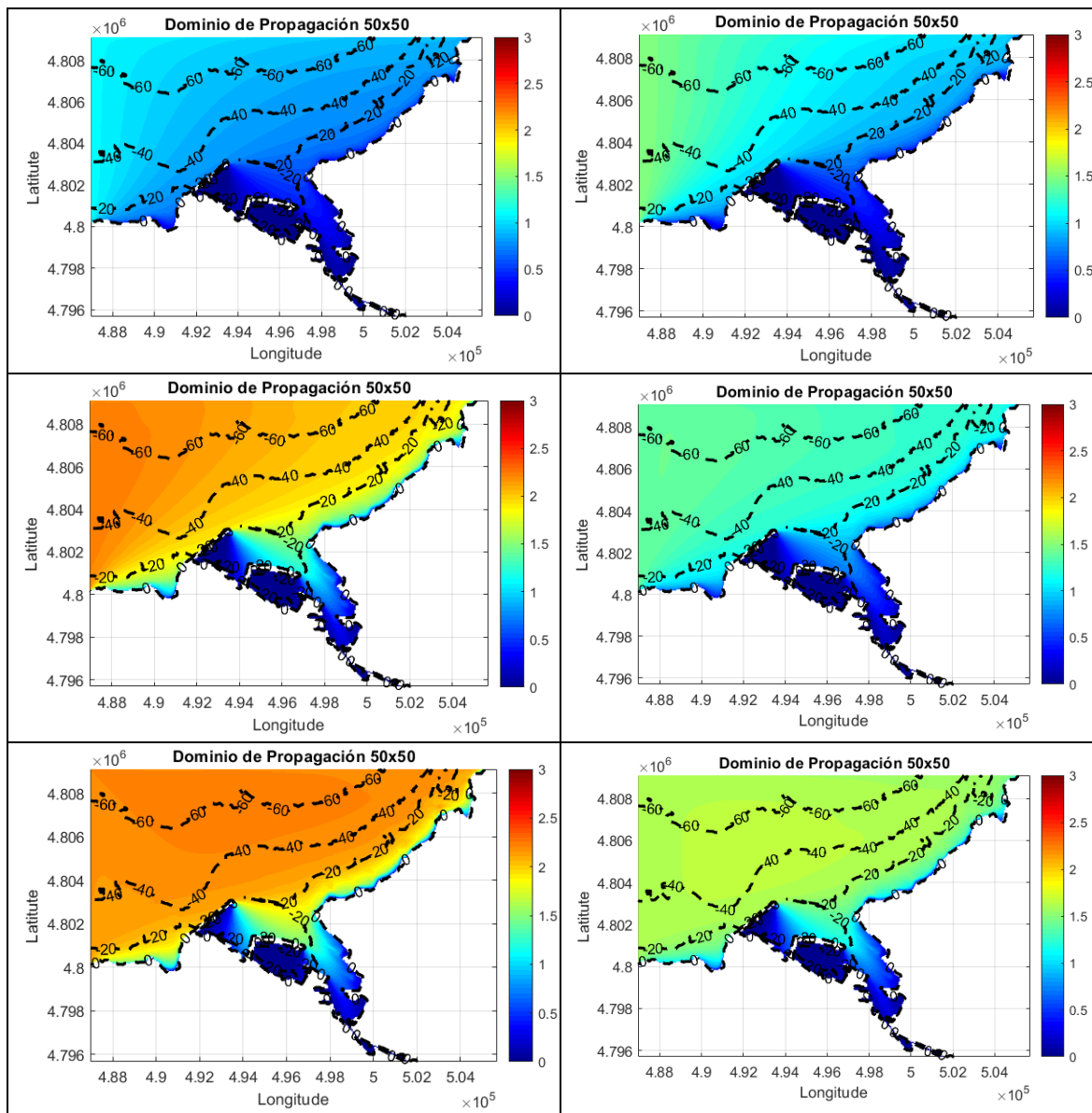


Figura 32.- Secuencia de la segunda tormenta analizada, con intervalos de 5 horas aproximadamente entre fotogramas.

A fin de poder valorar la validación del modelo, es necesario cuantificar el error entre los datos medidos y los modelados. Para ello, se ha realizado el cálculo del área bajo la curva formada por los datos de altura de ola significativa mediante el método trapezoidal, ya que la cantidad de energía (E) es proporcional a la altura de ola significativa (H_s) al cuadrado (ver ecuación nº 9). Es decir:

$$E \propto H_s^2 \quad [\text{ec. 9}]$$

Tal y como se puede apreciar cualitativamente en la figura 30, los puntos que pueden ser más representativos son los de las playas de La Arena, Aizkorri y Ereaga. Los dos primeros son puntos que se encuentran en la zona exterior del Abra, mientras que el de Ereaga, es un punto interior. En la tabla nº 2 se muestran los valores del cálculo del área bajo la curva, junto a la diferencia absoluta y relativa para cada caso. En este trabajo se ha considerado que el modelo es válido en tanto en cuanto la desviación entre los datos medidos y los modelados no supere el 10%.

	La Arena	Aizkorri	Ereaga
Medido	12,8558	11,5315	4,4775
Modelado	11,719	11,7842	4,1218
Diferencia absoluta	1,1368	0,2527	0,3557
Diferencia relativa (%)	8,84	2,19	7,94

Tabla 2.- Resultados de la comparación entre las áreas formadas por las curvas de los datos medidos y modelados, junto con las diferencias absoluta y relativa para cada uno de ellos.

Lo que puede extraerse de la tabla 2, es que para los puntos escogidos para la comparativa entre los datos medidos y modelados, en ningún caso el valor de la diferencia relativa supera el criterio establecido. Por lo tanto, según este criterio, el modelo del oleaje realizado para la zona de estudio quedaría validado. En el siguiente capítulo se exponen las conclusiones extraídas de estos resultados, y también se hace una propuesta de trabajos futuros.

5.- Conclusiones y trabajos futuros

El objetivo de este capítulo es el de presentar las conclusiones de los trabajos mediante el resumen de los aspectos más significativos de los resultados obtenidos. Asimismo, en caso que se desee ampliar el ámbito de estudio seguido en esta tesina, se plantean los trabajos futuros que debieran seguirse para tal efecto.

5.1.-Conclusiones

A continuación, se exponen las conclusiones derivadas de los trabajos realizados a lo largo de esta tesina:

- Al comparar los datos obtenidos de la simulación en SWAN con los datos de las campañas de campo, se aprecia que el modelo es capaz de reproducir razonablemente bien los datos observados. A pesar que no se dan exactamente las mismas alturas de ola significativa, con errores relativamente pequeños, se dan valores del mismo orden de magnitud, de manera cuantitativa.
- De las gráficas comparativas en los valores medidos y modelados, se observa cuantitativamente que el modelo tiende a sobreestimar los valores bajos de altura de ola a partir de 1 metro de altura de ola. A partir de este valor de altura, el modelo tiende a subestimar los valores altos. Dado que SWAN realiza simulaciones de propagación del oleaje basado en el espectro de energía, una de las razones que explicarían por qué se obtienen estos resultados es que la localización de los instrumentos se encuentra cerca de la línea de costa y de las estructuras portuarias, y en estos puntos el modelo puede no ser capaz de propagar el oleaje correctamente debido a sus limitaciones.
- De las gráficas comparativas también se puede extraer que, en los momentos iniciales de los eventos de tormenta, cuando empieza a incrementarse la aportación de energía al sistema, al modelo le cuesta dar valores similares a los medidos. Sin embargo, a medida que las tormentas se disipan y, por tanto, disminuye la energía aportada, el modelo es capaz de obtener datos muy similares a los datos medidos.
- Tras cuantificar la diferencia obtenida al comparar los datos medidos y modelados en los puntos escogidos, se valida la capacidad del modelo para la zona de estudio, ya que en ninguno de los casos se supera el criterio establecido. Para esta cuantificación del error, se ha calculado el área encerrada bajo las curvas definida por los datos de altura de ola para cada instante, ya que esta integral corresponde a la cantidad de energía (E) que es proporcional a la altura de ola significativa al cuadrado. Al comparar ambos datos, en ningún caso se supera el 10% de error.

Finalmente, se observa que, durante los episodios de tormenta, incluso con las alturas de ola mayores, los diques del Puerto de Bilbao proporcionan zonas de aguas abrigadas a las embarcaciones atracadas. Con lo que, el modelo realizado con SWAN, se muestra como una herramienta de gran utilidad para la gestión portuaria, en tanto en cuanto se pueden realizar predicciones de la perturbación de la superficie del mar en distintos horizontes temporales y analizar la capacidad operativa del puerto.

5.2.-Trabajos futuros

A continuación, se exponen los trabajos futuros que se considera que se deben seguir tras el trabajo realizado a lo largo de esta tesina:

- Con el propósito de conseguir un modelo de mayor precisión, se propone modificar los parámetros físicos del modelo como, por ejemplo, la fricción con el lecho, agregar las interacciones no lineales entre olas, o introducir campos de vientos, entre otros. Mediante estas modificaciones, se debe analizar si se produce algún cambio en los valores de la altura de ola, de modo que se pueda llegar a disminuir el error producido al comparar los datos del modelo con los datos medidos.
- Con el objetivo de conseguir mejores simulaciones, se propone, también, la realización de la cuantificación del error de los diferentes casos que se ejecuten en SWAN mediante diferentes métodos a los utilizados en este trabajo. De esta manera, se puede seleccionar el modelo que desarrolle el menor error entre los datos medidos y los modelados. También debe tenerse en cuenta que, tal y como se ha comentado anteriormente, la localización de los instrumentos se encuentra muy próxima a la costa, con lo que la propagación con un modelo energético difícilmente será exacto a los datos de las mediciones. Por este motivo, también podría considerarse obtener puntos de medida más alejados de las playas, ya que SWAN no resuelve la reflexión ni la superficie libre.

Fuera del ámbito de esta tesina, pero siguiendo la línea de trabajo del proyecto en que se ha enmarcado, uno de los trabajos futuros que se propone es el de realizar simulaciones con la batimetría de la zona de estudio tras los trabajos de dragado. De esta manera, puede obtenerse una comparativa entre los modelos de oleaje en situaciones de pre y postdragado, y así analizar los efectos que se producen al modificar la batimetría.

Por último, una vez ajustado el modelo y afinado sus parámetros, también puede ser interesante evaluar los efectos del cambio climático en diferentes horizontes temporales para la zona de estudio. En cuanto a la gestión portuaria, pueden tenerse en cuenta los efectos en cuanto a la operatividad del Puerto. Además, puede aprovecharse el ámbito de estudio para la evaluación de los efectos en las playas adyacentes al Puerto de Bilbao, tanto en el interior como en el exterior de la zona del Abra.

Anejo 1 – Script utilizado para la simulación en SWAN

```

$*****HEADING*****
$ Bilbi - Playas Exteriores
$
$----- Section 1. Start
PROJECT 'BILBI' 'C1'
$***** MODEL INPUT *****
$----- Section 2. General
$
SET LEVEL = 0.00 NOR = 90.00 DEPMIN = 0.05 _
    MAXMES = 1000 MAXERR = 3 _
    GRAV = 9.81 RHO = 1025.00 INRHOG = 1 _
    CART
$
MODE NONSTAT TWOD
COORD CART
$
$----- Section 3. Model Description
$
CGRID REGULAR 486980 4795700 0 18700 13400 361 266 CIRCLE 36
0.0400 1.0000 40
$
INPGRID BOTTOM REG 486980 4795700 0 361 266 51.8006 50.3759
READINP BOTTOM 1 'Bati50x50.bot' 1 0 FREE
$
$----- Section 4. Input
$
$WIND 0.1 90.0
$
$----- Section 5. Boundary/Initial Conditions
$
INIT ZERO
$***BOUN SIDE N CCW CON PAR 4 10 315*** indica, Oleaje
NE(315°), Hs=4, PP=10s
BOU SHAPE JON 3.3 PEAK DSPR DEGREES
BOUNDSPEC SEGMENT IJ 0 0 0 266 0 266 361 266 CON FILE
'Bilbao.TPR' 1

$
$ -----
$ Nomenclature
$ -----
$ Muskiz (-15 m)
$ Pta Lucero (-15 m)
$ Dique Pta Lucero (-20 m)
$ Playa de Ereaga (-10 m)
$ Arrigungako (-5 m)
$ Galea-Alpenarri (-15 m)
$ Playa de Azcorri (-15 m)
$ Salvajes (-15 m)
$ Sopelana (-15 m)
$ Barikako Hondartza (-15 m)
$

```

```

$PUNTOS DE BILBAO. Los puntos son donde se obtendrán los
espectros y las tablas
POINT 'P1' 490283.30 4800997.71
POINT 'P2' 491099.69, 4801693.39
POINT 'P3' 492308.44, 4802306.01
POINT 'P4' 498148.50, 4799563.20
POINT 'P5' 497827.19, 4800840.94
POINT 'P6' 496788.56, 4803269.41
POINT 'P7' 497931.80, 4804068.94
POINT 'P8' 498918.14, 4804360.35
POINT 'P9' 499777.44, 4804965.60
POINT 'P10' 501443.74, 4806422.68
POINT 'BOIA' 486980.0000, 4805019.5000
$489156.83,4805077.80
$
$
$----- Section 6. Physics
$
OFF WINDGROWTH
OFF QUADRUPL
OFF WCAP
BREAKING
FRICTION MADSEN 0.05
TRIAD 1 0.65 2.5 0.95
DIFFRAC
PROP BSBT
$
$----- Section 7. Numerics
$
NUM STOPC NONSTAT 5
$
$----- Section 8. Output Sets
$
$

SPEC 'P1' SPEC2D ABS 'P1cc.sp2'
SPEC 'P2' SPEC2D ABS 'P2cc.sp2'
SPEC 'P3' SPEC2D ABS 'P3cc.sp2'
SPEC 'P4' SPEC2D ABS 'P4cc.sp2'
SPEC 'P5' SPEC2D ABS 'P5cc.sp2'
SPEC 'P6' SPEC2D ABS 'P6cc.sp2'
SPEC 'P7' SPEC2D ABS 'P7cc.sp2'
SPEC 'P8' SPEC2D ABS 'P8cc.sp2'
SPEC 'P9' SPEC2D ABS 'P9cc.sp2'
SPEC 'P10' SPEC2D ABS 'P10.sp2'
TABLE 'P1' NOHEAD 'P1cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P2' NOHEAD 'P2cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P3' NOHEAD 'P3cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P4' NOHEAD 'P4cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P5' NOHEAD 'P5cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR

```

Anejo 1 – Script utilizado para la simulación en SWAN

```
TABLE 'P6'      NOHEAD 'P6cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P7'      NOHEAD 'P7cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P8'      NOHEAD 'P8cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P9'      NOHEAD 'P9cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'P10' NOHEAD 'P10cc.tab' Time HS RTP TM01 DIR DSPR PDIR
OUT 20170416.000000 1 HR
TABLE 'BOIA'    NOHEAD 'BOIA.tab'  Time HS DIR TM01 OUT
20170416.000000 1 HR
$
BLOCK 'COMPGRID' NOHEAD 'Bilbi.mat' LAY 3 XP YP HS BOTLEV RTP
TM01 DIR OUT 20170416.000000 6 HR
$
$----- Section 10. Run
COMPUTE NONSTAT 20170416.000000 1 HR 20170430.000000
STOP
$
```

BIBLIOGRAFÍA

- [1] *Bilbao, el puerto que buscó el mar.* **Alzaga Sagastasoloa, Carlos.** 2017. 3588, s.l. : ROP, junio 2017, Revista de Obras Públicas.
- [2] **Bilbao, Puerto de.** Bilbao Port. [Online] <https://www.bilbaoport.eus/el-puerto/la-historia/>.
- [3] *Characteristics of global waves based on the third-generation wave model SWAN.* **Liang, Binchen, Gao, Huijin and Shao, Zhuxiao.** 2019. s.l. : Elsevier, 2019, Marine Structures.
- [4] *Desarrollo urbano en el Litoral a Escala Mundial. Método de Estudio para su Cuantificación.* **de Andrés, M. and Barragán, J.M.** 2016. 2016, Revista de Estudios Andaluces, Vol. 33.
- [5] **Dykes, James D., Hsu, Y. Larry and Rogers, W.Erick.** *SWAN evaluation in the northern gulfs of Mexico.* Oceanography division, Navar Research Laboratory, Stennis Space Center.
- [6] **EMODnet.** EMODnet Bathymetry. [Online] <https://portal.emodnet-bathymetry.eu/>.
- [7] *Evaluación de modelos numéricos de Tercera Generación para el pronóstico del oleaje en Centroamérica y México.* **Lizano, Omar G., et al.** 2001. s.l. : Research gate, 2001.
- [8] **García-Valdecasa, J.M.** 2016. *Modelos oceánicos de propagación de oleaje.* Puertos del Estado, Ministerio de Fomento. 2016.
- [9] **Genius Coca, Alba.** 2016. *Impacte del canvi climàtic sobre l'agitació i l'operativitat del Port de Barcelona.* Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, UPC. 2016. TFG.
- [10] **Hernández Miguel, Héctor.** 2015. *Predicción del oleaje mediante técnicas de conjuntos en la costa catalana.* Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, UPC. 2015. TFG.
- [11] **Holthuijsen, Leo H.** 2007. *Waves in oceanic and coastal waters.* s.l. : Cambridge University Press, 2007.
- [12] *Incidencia del tráfico marítimo sobre ciudades y puertos.* **Esteban Chapapría, Vicent.** 2017. 3591, s.l. : ROP, octubre 2017, Revista de Obras Públicas.
- [13] **Losada Rodríguez, Íñigo, et al.** 2011. *Evaluación del potencial de la energía de las olas. Estudio Técnico PER 2011-2020.* Edición de estudios técnicos, IDAE. 2011. Estudio técnico.
- [14] **Martin Morata, Albert.** 2014. *Influencia de los mecanismos de forzamiento sobre la circulación en los alrededores del Puerto de Bilbao.* Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, UPC. 2014. TFG.

- [15]**N. Booij, R. C. Ris, and L. H. Holthuijsen. 1999.** *A third-generations wave model for coastal regions, Part 1: Model description and validation.* s.l. : J. Geoph. Research, 1999.
- [16]**Romero Pascual, Elisa. 2014.** *Caracterización experimental del campo de circulación en las proximidades del Puerto de Bilbao.* Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, UPC. 2014. TFG.
- [17]**Sellés Valls, Susana. 2017.** *Wave propgation patterns along the northern Catalan coast.* Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental, UPC. 2017. TFG.
- [18]**Tecnalia, AZTI and LIM/UPC. 2017.** *ASISTENCIA TÉCNICA PARA EL SEGUMINIENTO AMBIENTAL DEL PROYECTO DE EXTRACCIÓN DE ARENAS EN EL SECTOR NORTE DE LA ZONA II DE LA APB (2016-2020) CON ESPECIAL VINCULACIÓN AL PROYECTO DEL ESPIGÓN CENTRAL - Informe de campaña primavera 2017 .* 2017.
- [19]**The SWAN team. 2017.** *Limitations.* Delft University of Technology. 2017.
- [20]**The SWAN team. 2006.** *SWAN technical documentation.* Delft University of Technology. 2006.
- [21]**The SWAN team. 1993.** *SWAN user manual.* Delft University of Technology. 1993.
- [22]**Young, I.R. 1999.** *Wind generated ocean waves.* s.l. : Elsevier, 1999.